

T.C.
ISPARTA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ENDÜSTRİYEL BİR TAV FIRININ ENERJİ, EKSERJİ VE
EKONOMİK ANALİZİ

Doğan ÇELİK

I. Danışman
Prof. Dr. Ali Kemal YAKUT

II. Danışman
Dr. Mehmet ALTINKAYNAK

ISPARTA - 2019



© 2019 [Doğan ÇELİK]

TEZ ONAYI

ENDÜSTRİYEL BİR TAV FIRININ ENERJİ, EKSERJİ VE EKONOMİK ANALİZİ

Doğın ÇELİK tarafından hazırlanan bu tez çalışması aşğıdaki jüri tarafından Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü **Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı**’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

İmza

Başkan	Prof. Dr. Ali Kemal YAKUT Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi
Üye	Prof. Dr. Arzu ŞENCAN ŞAHİN Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi
Üye	Doc. Dr. Feyza AKARSLAN Süleyman Demirel Üniversitesi Üniversitesi
Üye	Dr. Öğr. Üyesi Kamil DELİKANLI Süleyman Demirel Üniversitesi Üniversitesi
Üye	Dr. Mehmet ALTINKAYNAK Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi



Yukarıdaki Jüri kararı Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun/...../..... tarih ve/..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof.Dr. Yusuf UÇAR
Enstitü Müdürü

ETİK BEYANI

Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak ve bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yol ve yardıma başvurmaksızın hazırladığım bu tez çalışmasında;

Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi, kullanılan verilerde ve ortaya çıkan sonuçlarda herhangi bir değişiklik yapmadığımı, bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu, tezimle ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçlara katlanacağımı bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

03/07/2019

Doğın ÇELİK

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER.....	i
ÖZET	ii
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	v
ÇİZELGELER DİZİNİ	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	vii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	3
3. ENDÜSTRİYEL TAV FIRINI.....	9
3.1. Tav Fırınının Özellikleri.....	9
3.1.1. Tav fırını çalışma prensibi.....	10
3.1.2. Tav fırını reküperatör özelliği.....	10
3.1.3. Tav fırını duvarının özellikleri.....	12
4. TAV FIRINI TERMODİNAMİK ANALİZ	13
4.1. Denge Denklemleri	17
4.1.1. Tav fırını denge denklemleri.....	19
4.2. Tav Fırını Yüzeyi Isı Transferi Denklemleri.....	30
4.2.1. Tav fırınındaki enfiltrasyon kayıpları	31
4.3. Eksergoekonomik Analiz	31
4.3.1. Endüstriyel tav fırının eksergoekonomik analizi	33
5. BULGULAR VE TARTIŞMA	36
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	46
KAYNAKLAR.....	48
ÖZGEÇMİŞ.....	51

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ENDÜSTRİYEL BİR TAV FIRININ ENERJİ, EKSERJİ VE EKONOMİK ANALİZİ

Doğan ÇELİK

Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı

I.Danışman: Prof. Dr. Ali Kemal YAKUT

II.Danışman: Dr. Mehmet ALTINKAYNAK

Türkiyede en yüksek enerji girdisine sahip sektörlerin başında endüstri sektörü gelmektedir. Bu sektörler içerisine bakıldığında, demir çelik sektörünün ilk sıralarda olduğu görülmektedir. Yüksek enerji ihtiyacının olduğu bu demir çelik sektöründe enerjinin maksimum düzeyde verimli kullanılmasını sağlamak gerekmektedir. Enerjinin kullanılabilirliğini ifade eden ekserji terimi bu sektörde ön plana çıkmaktadır.

Bu çalışmada yüksek enerji girdisine sahip olan, yanma havası fanı, havanın ön ısıtılmasını sağlayan reküpertör, kütüğün tavlandığı tav fırını, yakma havasının ortamdan uzaklaştırıldığı baca gazı fanı ve sistemdeki kütük taşıyıcı ve rolelerin ısıl deformasyonunun önlenmesini sağlayan gövde soğutma sistemi bileşenlerinden oluşan bir tav fırınının enerji ve ekserji analizi yapılmıştır. Yapılan analizlerde ideal baca gazı basıncının 40 kPa olduğu görülmüştür. Ayrıca en yüksek ekserji yıkımının % 63 ile tav fırınında gerçekleştiği görülmüştür. Tavlanan kütük başına 565 kJ/kg'lık bir enerji ihtiyacının olduğu görülmüştür. Baca dan atılan yaklaşık 200 °C deki baca gazının ideal bir rankine çevrimi uygulamasıyla yaklaşık 3 MW'lık bir güç üretiminin sağlanabileceği önerilmiştir. Ayrıca bacadan atılan bu atık gazın fabrikanın ısınma ve sıcak su (kullanım suyu) ihtiyacını karşılamasında kullanılabileceği ifade edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Enerji, Ekserji, Tav fırını, Çelik, CH₄

2019, 51 pages

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

ENERGY, EXERGY AND ECONOMIC ANALYSIS OF AN INDUSTRIAL TAV FURNACE

Doğ an ÇELİK

**Isparta University of Applied Sciences
The Institute of Graduate Education
Department of Energy Systems Engineering**

Supervisor: Prof. Dr. Ali Kemal YAKUT

Co-Supervisor: Dr. Mehmet ALTINKAYNAK

The industry sector is one of the sectors with the highest energy input in Turkey. When these sectors are analyzed, it is seen that iron and steel sector is in the first place. In this iron and steel sector, where there is high energy need, it is necessary to ensure the maximum efficient use of energy. The term exergy, which expresses the usability of energy, comes to the fore in this sector.

In this study, energy and Exergy analysis of a tav furnace consisting of combustion air fan with high energy input, recuperator that provides preheating of air, annealed tav furnace, flue gas fan where incineration air is removed from the environment, and body cooling system components that prevent thermal deformation of the log carrier and roles in the system were conducted. Analysis showed that the ideal flue gas pressure was 40 kPa. Furthermore, the highest Exergy destruction occurred in the tav furnace with 63%. There was an energy requirement of 565 kJ/kg per annealed billet. It has been proposed that the flue gas at about 200 °C ejected from the flue can be produced with an ideal rankine cycle of about 3 MW. In addition, it is stated that this waste gas from the chimney can be used to meet the warm-up and hot water (use water) requirement of the plant.

Key Words: Energy, Exergy, Annealing furnace, Steel, CH₄

2019, 51 pages

TEŞEKKÜR

Tezimin yürütülmesinde desteğini ve emeğini hiçbir zaman esirgemeyen tez danışmanım sayın Prof. Dr. Ali Kemal YAKUT'a, diğer danışmanım Dr. Mehmet ALTINKAYAK'a, çalışma süresince bana desteklerinden dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Tezimin her aşamasında beni yalnız bırakmayan aileme sonsuz sevgi ve saygılarımı sunarım.

Doğın ÇELİK
ISPARTA, 2019



ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 1.1 Türkiye çelik haritası.....	2
Şekil 3.1 Tav fırın örneği	9
Şekil 3.2 Reküperatör	11
Şekil 3.3 Reküperatör kontrol paneli	11
Şekil 3.4. Tav fırın duvar kesiti	12
Şekil 4.1 Endüstriyel tav fırını akış diyagramı.....	13
Şekil 4.2 Fırın giriş çıkış role yerleşimi	14
Şekil 4.3. Yürüyen kirişli fırın kesiti	15
Şekil 4.4 Tav fırını ısı bölgesi kontrol panel görüntüsü	16
Şekil 4.5. Tav fırını yanma havası fanı	20
Şekil 4.6. Reküperatör	22
Şekil 4.7. Endüstriyel tav fırını	24
Şekil 4.8. Soğutma suyu pompası	27
Şekil 4.9. Soğutma kulesi (Yoğuşturucu)	28
Şekil 4.10. Baca fan sistemi	29
Şekil 5.1. Baca gazı fanı giriş basıncına bağlı ekserji yıkım diyagramı	37
Şekil 5.2 Baca gazı fan basıncı ekserji yıkımı.....	38
Şekil 5.3. Yakma havası fan basıncı ekserji yıkımı.....	38
Şekil 5.4. Yakma havası fanı basınç değişimi diyagramı	39
Şekil 5.5 Reküperatör ekserji yıkımı	40
Şekil 5.6. Reküperatör ekserji verim diyagramı.....	40
Şekil 5.7. Tav fırını ekserji yıkımı diyagramı	41
Şekil 5.8. Tav fırınındaki yakma havası ekserji diyagramı.....	42
Şekil 5.9. Tav fırını yakma havası ekserji verim diyagramı	43
Şekil 5.10. Tav fırını gövde soğutma suyu basınç değişimine bağlı ekserji yıkımı	44
Şekil 5.11. Tav fırını soğutma suyu pompası ekserji verim diyagramı	45
Şekil 5.12 Kondanserdeki havanın ekserji verim diyagramı.....	45

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 4.1 Tav fırını brülör yerleşim	16
Çizelge 4.2. Yanma fanı özellikleri	20
Çizelge 4.3. Havanın kimyasal özellikleri	21
Çizelge 4.4. Reküperatör teknik özellikleri	25
Çizelge 4.5. Baca gazı özellikleri	23
Çizelge 4.6. Baca gazının kimyasal özellikleri	23
Çizelge 4.7. SAE 1008 kütüğünün kimyasal bileşenleri	24
Çizelge 4.8 Doğalgazın kimyasal bileşenleri	24
Çizelge 4.9. Doğalgazın teknik özellikleri	26
Çizelge 4.10. Yanma havasının kimyasal bileşenleri	26
Çizelge 4.11 Soğutma suyunun kimyasal bileşeni	27
Çizelge 4.12. Bacanın özelliği	29



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A	Isı transfer yüzey alanı
ch	Kimyasal
$\dot{c}$	Çıkan
d	Çap
ex	Prosesin spesifik ekserjisi
$\dot{E}_x$	Ekserji transfer hızı
$\dot{E}_{x_Y}$	Ekserji yıkım hızı
$\dot{E}_{x_Q}$	Isı transfer hızının ekserjisi
$\dot{E}_{x_W}$	İş ile alakalı ekserji transfer hızı
g	Giren
h	Özgül entalpi
LHV_y	Yakıtın alt ısı değeri
k	Lineer ısı iletim katsayısı
ke	Kinetik enerji
L	Duvar kalınlığı
$\dot{m}$	Kütleli debi
n	Devir sayısı
M	Mol ağırlığı
P	Basınç
pe	Potansiyel enerji
ph	Fiziksel
s	Entropi
t	Zaman
T	Sıcaklık
η	Verim
ρ	Yoğunluk
$\dot{Q}$	Isı enerjisi
$\dot{W}$	İş enerjisi
Y	Yüzde
ξ_i	Kimyasal ekserji

1. GİRİŞ

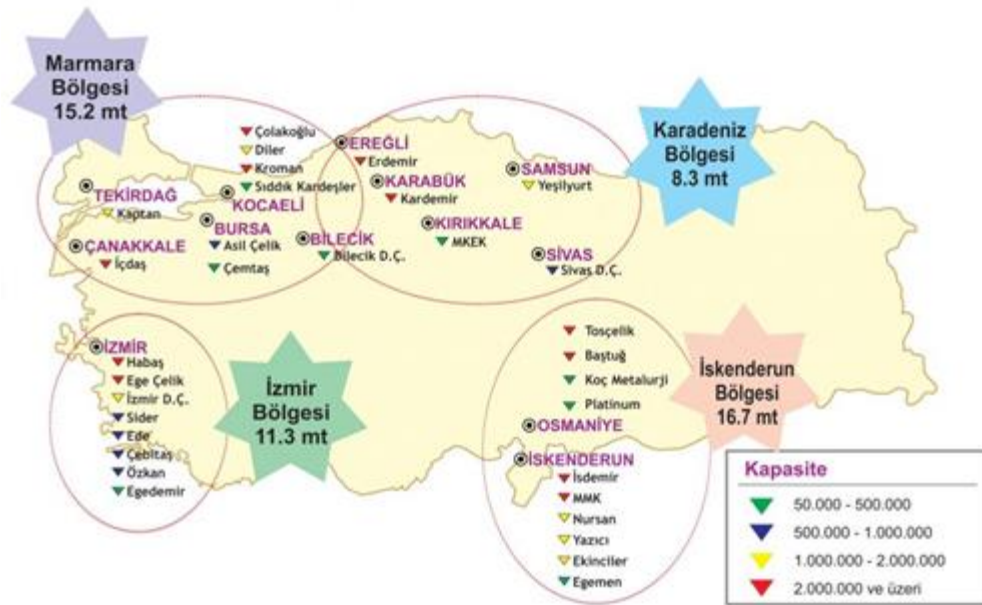
Gelişen teknoloji insanoğlunun yaşam standardını belirleyen en önemli unsurlardan biri olmuştur. Hayatımızın her noktasında var olan teknolojinin vaz geçilmezi enerjidir. Gelişen teknolojiye olan bağlılığımızı, enerjiye olan bağlılığımızın bir göstergesi olarak kabul edebiliriz. Enerji konusunda sınırlı kaynak sahibi olan dünyamızda enerji kaynaklarının önemi her geçen gün artmaktadır. Enerji ihtiyacının artmasıyla birlikte enerjinin daha verimli tüketilmesi konusunda yapılan çalışmalar artmaktadır. Hükümetler bilinçsiz enerji tüketimini sınırlandırmak için çalışmalarını arttırmışlardır. Bilimsel çevrelerin enerji üretim ekipmanlarını yeniden değerlendirerek verimliliği arttırmasına ve sınırlı enerji kaynaklarını daha verimli kullanmak için yeni teknolojik yöntemler geliştirmenine yönelmektedir (Çengel, 1996).

Türkiye, yeraltı enerji kaynakları bakımından zengin bir ülke değildir. Üretilen enerjinin büyük bir kısmı ithal edilen enerji kaynaklarından sağlanmaktadır. Ülkemizdeki gelişen teknoloji ile birlikte enerji ihtiyacımızın artışı ve yetersiz fosil yakıtlara sahip olmamız enerjide dışa bağlılığımızı arttırmaktadır. Ülkemiz enerji tüketiminin % 70'den fazlasını ihtal etmektedir. Bu da enerji kaynaklarında dışa bağlı olan ülkeler gibi enerji kaynaklarının ve enerji tüketiminin verimli kullanılması konusunda zorunluluk getirmektedir (Bayrak ve Esen, 2014).

Türkiye'nin enerji alanında, tüm diğer gelişmekte olan ülkelere benzer, kısır döngüyü andıran bir konumu vardır. Az enerji tüketir fakat; tükettiği az enerjiyi, verimli ve temiz bir şekilde kullanamamaktadır. Bu tabloyu iyileştirebilmek için; bir yandan ekonomisini hızla büyütmek, diğer yandan da; büyüyen kaynaklarından ayıracağı artan oranlardaki payları, enerji arz ve tüketim sistemini daha verimli ve temiz bir yapıya dönüştürmeye yönelik öncelikli araştırma ihtiyaçları arasında, dikkatli saptamalarla dağıtmak zorundadır. Öte yandan; Türkiye, özkaynaklarının yetersizliği nedeniyle dışa bağımlı ve bu bağımlılık oranı giderek artmaktadır. Dolayısıyla; enerji ithalatına bağımlılığından kaynaklanan riskleri kontrol altında tutabilmek için; rekabet şansına sahip olabileceği enerji teknolojisi alanlarını dikkatli bir öncelikler sıralamasına tabi tutup, araştırma yoğunlaşmalarına gitmek ve enerji dünyasındaki itici

güçlerin işaret ettiği yönlerde, çağdaş ürün katkılarıyla, uluslararası enerji pazarında etkin bir yer edinmek zorundadır (Arı, 2007).

Çelik endüstrisi, dünyada en fazla enerji tüketen sektörler arasında yer almaktadır. Enerjiyi yoğun kullanan çelik sektörünün, Türkiye'nin toplam enerji tüketimi içerisindeki payı, % 7.5, sanayi tüketimi içerisindeki payı ise % 23 seviyelerindedir. Çelik sektörümüzde, enerjinin girdi maliyetlerinde payı, hammaddeden sonra 2. sırada yer almaktadır. Enerjinin girdi maliyetlerindeki payı % 15-25 civarında yüksek bir orana sahiptir. Enerjinin üretim maliyetleri içerisindeki payı, enerjinin çelik sektörü açısından nasıl bir öneme sahip olduğunu göstermeye yetmektedir. Bu sebeple, çelik sektörümüz, enerji verimliliğini arttırıcı projelerin geliştirilmesi konusunda, kendisine bir yol haritası çizmiştir. Çelik sektörü teknolojisini sürekli bir şekilde geliştirerek, yenileme yönünde çalışmalarını sürdürmektedir. Çelik sektörümüzde, enerji verimliliği çalışmaları 80'li yıllarda başlamıştır. Çelik sektöründe son 10 yılda yapılan çalışmalar dikkate alındığında; ham çeliğin ton başına enerjinin tüketiminde, % 18-20 civarında bir tasarruf sağlanmıştır (TDDMM Raporu, 2016).



Şekil 1.1 Türkiye çelik haritası (TCUD, 2019)

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Yapılan çalışmada, bir sıcak haddehane işletmesindeki tav fırınının performansını ve enerji tüketimini incelemişlerdir. Yapılan incelemede tav fırınındaki enerji veriminin, üretim hızının artışına paralel olarak arttırdığı gözlemlenmiştir. Tav fırınında yapılan ölçümlerde, tav fırınında ihtiyaç duyulan enerjinin % 80'inin yakıtın yanmasından ve % 15.7'sinin sıcak baca gazından elde edildiği gözlemlenmiştir. Yapılan incelemeler neticesinde ısı geri kazanım bölgesindeki ısı değişiminin % 86.66 ve ısı geri kazanım verimliliğinin % 47.76 olduğunu bulunmuştur (Chen vd., 2005).

Yapılan çalışmada, endüstriyel bir tav fırınında kullanılan enerjinin analizini yapmışlardır. Tav fırınına giren enerji ile ürüne aktarılan enerji arasındaki fark incelenmiştir. Tav fırınına ait ısı verim, enerji kayıplarının türleri ve miktarları belirlenmiştir. Tav fırınına ait ısı verimin % 38.3, baca gazı kaybının % 31.6, yüzey kayıplarının % 13, açıklık kayıplarının % 10.4 ve diğer kayıpların % 6.7 olduğu yapılan hesaplamalarla bulunmuştur. Enerji analizi sonucunda verimlilik çalışmaları yapılmıştır. Tav fırınının verimliliği ile ilgili görüş ve öneriler bulunulmuştur (Ertem vd., 2008).

Yapılan çalışmada, Çumra Şeker Fabrikası ait 2006/2007 yılı verileri kullanılarak sistemin termodinamik analizi yapılmıştır. Termodinamik ikinci kanun hesaplamalarında sistem açık devre olarak kabul edilmiştir. Hesaplamalar sonucunda sistemdeki meydana gelen kayıplar bulunmuştur. Üretim prosesinde meydana gelen toplam tersinmezlikler % 85.8 olarak hesaplanmıştır. Proseste meydana gelen en büyük tersinmezliğin % 70.4'lük orana sahip olan enerji üretim ünitesine olduğu görülmüştür (Türközü, 2008).

Yapılan çalışmada, yıllık 24 milyon m² üretim kapasitesine ait bir seramik tesisinin işletme verileri kullanılarak enerji ve ekserji analizi yapılmıştır. Kurutma sistemi, üç aşamada analiz edilmiştir. 22 °C'lık bir referans (ölü hal) sıcaklığında sistemin tüm bileşenleri, tüm sistemin ekserji yok oluşu ve verimi hesaplanmıştır. Ocak 2009 yılı verilerine göre, püskürtmeli (spray) kurutucunun enerji verimi % 65.5, ekserji verimi ise % 53.7 olarak hesaplanmıştır. Sistemdeki dikey kurutucunun enerji verimi ise % 39 olarak hesaplanmıştır (Turan, 2009).

Yapılan çalışmada, İzmir’de faaliyetini sürdüren Turyağ toz deterjan üretim tesisi işletme verileri kullanılarak enerji ve ekserji analizi yapılmıştır. Tesise ait sülfasyon, sülfonasyon, arıtma ve toz deterjan ünitelerinin kütle, enerji ve ekserji denklilikleri oluşturularak, ısı ve ekserji kayıpları hesaplanmıştır. Tesisin enerji ve ekserji verimleri karşılaştırılmıştır. İşletmeye ait enerji verimi % 68, ekserji verimi ise % 53 bulunmuştur. Ayrıca tesise ait buhar üretim ünitesinin de enerji ve ekserji analizi yapılmıştır. Buhar ünitesine ait enerji verimi % 93 ve ekserji verimi % 55 olarak hesaplanmıştır. Sistemlerdeki enerji ve ekserji veriminin, fazla havanın yüzdesi, giren hava sıcaklığı ve buhar sıcaklığı gibi parametric değerler ile etkileşimleri incelenmiştir. Enerji ve ekserji veriminin fazla hava yüzdesinin artışı ile arttığı, giren hava sıcaklığının kaydedilir bir etkisi olmadığını gözlemlenmiştir. Ayrıca, buhar sıcaklığının arttırılmasının enerji verimi üzerinde önemli bir etkisi olmadığı, ekserji verimini ise olumsuz yönde etkilediği gözlemlenmiştir (Bektaş, 2009).

Yapılan çalışmada, reküperatör ve birleştirilmiş rejeneratif brülörlerin bulunduğu tav fırınının enerji analizini yapılmıştır. Yanma havasının reküperatör ile 300 °C’ye kadar ısıtılabilmesini, ancak rejeneratif brülörlerin 1000 °C’ye kadar yakma havasını ısıtılabilmesinden yola çıkarak; reküperatif ve rejeneratif brülörleri birleştirilerek kombinasyon yapmışlardır. Reküperatör ile rejeneratif brülör kombinasyonunun verimliliğini bulmuşlardır. Reküperatör kullanılan tav fırınları ile kombinasyonlu tav fırınları karşılaştırıldığında, enerjiden % 43.4 tasarruf edilebileceği konusunda görüşe varışlardır (Manatura ve Tangtrakul 2010).

Yapılan çalışmada, Erdemir fabrikasında bulunan 3 nolu slab tav fırınının, enerji dengesi ve enerji tasarruf yöntemlerini incelemişlerdir. Slap tav fırınındaki enerji kayıplarının tespiti için tav fırınına giren ve çıkan enerjiler ayrı ayrı hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalarda, 3 nolu slap tav fırının enerji verimliliği % 64.26 bulunmuştur. Slap tav fırınındaki enerji verimini arttırmak için şarj sıcaklığının arttırılması ve baca gazındaki enerjinin reküperatör ile geri kazanılması suretiyle enerjiden tasarruf edileceği konusunda önerilerde bulunmuşlardır (Ertem vd., 2010).

Yapılan çalışmada, demir-çelik tesisine ait tav fırınının enerji verimlilik potansiyelini incelemiştir. Tesisteki tav fırınındaki enerji veriminin % 60 olduğu hesaplanmıştır. Tav fırınındaki kayıplar incelendiğinde en büyük enerji kaybının baca gaz kayıpları

olduğu görülmüştür. Baca gazı kayıplarının % 29.5 bir paya sahip olduğu yapılan hesaplamalarda görülmüştür. Bacadan atılan atık gaz ısısındaki kayıpların geri kazanılabileceği vurgulanmıştır. Tav fırınına giren kütüklerin baca atık gazı ile 315 °C'ye kadar ön ısıtılması durumunda birim enerji tüketiminin düşeceği ve enerjiden tasarruf edileceği belirtilmiştir (Si vd., 2011).

Yapılan çalışmada, endüstriyel tavlama fırınının enerji ve ekserji verimleri, kayıpları, enerji tasarrufu ve maliyet avantajını incelemiştir. Tav fırınındaki yanma odası ve tavlama odasının enerji ve ekserji verimlerini de incelemiştir. Tav fırınında gerçekleşen yanmanın ekserji verimini % 47.1 olarak hesaplanmıştır. Tavlama odasının enerji verimi % 17.7, ekserji verimi ise % 12.9 olarak hesaplanmıştır. Tavlama fırınına ait toplam enerji verimi % 16.7, ekserji verimi % 7.3 olarak bulunmuştur. Tavlama odasının, tavlama fırınının yanma odasının yaklaşık % 57'lik ekserji yıkımı ile en büyük paya sahip olduğunu bulmuştur. Tavlama fırınında yanma sonucu oluşan atık gazdaki ısıdan faydalanılması için bir ısı geri kazanım sistemi kurulması durumunda enerjiden % 8.1 tasarruf edilebileceği öngörülmüştür. Isı geri kazanımın için yapılacak olan yatırım maliyetlerin 2 aydan kısa bir sürede amorti edeceği belirtmiştir (Hasanuzzaman vd., 2011).

Yapılan çalışmada, Kardemir A.Ş.'e ait haddehane I ve haddehane II bölümlerindeki endüstriyel tav fırınlarının enerji dengesi ve enerji verimliliği konusunda hesaplamalar yapmışlardır. Endüstriyel tav fırınında yapılan hesaplamalarda, haddehane I'e ait tav fırınının verimi % 61.83, haddehane II tav fırınına ait verimi ise % 60.86 olarak bulmuşlardır. Tav fırınlarının enerji verimlerini arttırmak için meydana gelen kayıplar incelenerek enerji tasarrufu konusunda iyileştirme yapılabilecek yerler belirlenmiştir. Tav fırınlarında yapılabilecek iyileştirmeler sonucunda haddehane I tav fırınına ait enerji veriminin % 76.80'e, haddehane II tav fırınına ait enerji veriminin ise % 77.20'ye kadar çıkarılabileceği hesaplanmıştır (Kılınç, 2012).

Yapılan çalışmada, cam temperleme fırınının enerji analizinin nasıl yapılacağı anlatılmıştır. Örnek bir cam temperleme fırınının enerji verimi % 16.23 olarak bulunmuştur. Bu hesaplamada fırın yüzeyindeki ısı kayıpları ve ısı kaçakları termal kamera yardımıyla bulunmuştur. Fırının verimini etkileyen ısı kayıp ve kaçakları belirlenmiştir. Fırının verimini artırıcı yöntemler gözden geçirilmiştir. Bacadan

atılan ısıнын ve yüzeyden iletim ve sızıntıyla olan kayıpların yarısının fırın için geri kazanılması durumunda fırının veriminin % 27.38'e kadar çıkarılabileceği hesaplanmıştır (Tütünoğlu vd., 2012).

Yapılan çalışmada, Adana ilinde bulunan bir çimento fabrikasının yıllık işletme verilerini kullanarak enerji ve ekserji analizi yapılmıştır. İşletmedeki her sistem için ayrı ayrı hesaplamalar yapılmıştır. Farin değirmeninin enerji verimi yıllık ortamana % 74 ve ekserji verimi yıllık ortalama % 12, kömür değirmeninin enerji verimi yıllık ortalama % 97 ve ekserji verimi yıllık ortalama % 65, çimento değirmeninin enerji verimi yıllık ortalama % 73 ve ekserji verimi yıllık ortalama % 87 olarak hesaplanmıştır (Kandilci, 2013).

Yapılan çalışmada, tam yükte 660 MW güç üretebilen buharlı güç santralının % 100, % 70 ve % 40 oranlarındaki çalışma yüklerinin değerleri kullanılarak enerji ve ekserji analizi yapılmıştır. Sistem üzerindeki ekipmanlar ayrı ayrı incelenerek en fazla enerji ve ekserji kaybı olan ekipmanlar belirlenmiştir. Yapılan hesaplamalarda en fazla enerji kaybının kondenserde, en fazla ekserji kaybının ise kazanda olduğu görülmüştür. Yapılan hesaplamalar sonucunda ekserji analizinin enerji analizine göre önemli olduğu görülmüştür. Ekserji kayıplarının azaltılması durumunda sistem veriminin artacağı görülmüştür (Tontu, 2013).

Yapılan çalışmada, yakıt olarak LNG kullanan bir haddehane tav fırınının enerji verimliliği incelenmiştir. Hesaplamalarda endüstriyel tav fırınından alınan veriler kullanılarak tav fırınına ait enerji dengesi oluşturulmuştur. Yapılan hesaplamalarda endüstriyel tav fırınına ait verim % 52.76 bulunmuştur. Enerji verimini arttırmak için tav fırınına giren fazla havanın azaltılması ve fırındaki ısı geri kazanım olarak kullanılan reküperatörün yeni yüksek kapasiteli reküperatör ile değiştirilmesi sonucunda oluşabilecek tasarruf belirlenip önerilerde bulunulmuştur (Eyidoğan vd., 2014).

Yapılan çalışmada, endüstriyel tav fırınının duvarlarında ısı dağılım oranları incelenmiştir. Yapılan incelemede standart kalınlıktaki yalıtım malzemeleri yerine endüstriyel tav fırını içerisindeki ısı dağılım oranları göz önünde tutularak ısı kaybını azaltmak için aynı yalıtım malzemelerinin en uygun ölçüleri hesaplanmak istenmiştir.

Sabit kalınlıktaki yalıtım malzemeleri yerine, ısı dağılımlarına göre yalıtım malzemelerinin kalınlıklarının kullanılması durumunda meydana gelen ısı kaybının % 8.85 azalacağı tesbit etmişlerdir (Feng vd., 2014).

Yapılan çalışmada, 650000 metreküplük üretim kapasitesine sahip bir gazbeton üretiminin işletme verilerini kullanarak enerji ve ekserji analizleri yapılmıştır. Gaz beton tesisinde bulunan otklav ünitesi, buhar kazanı ve ısı geri kazanım ünitelerinin ölü hal sıcaklığındaki (19 santigrat derecedeki) ekserjinin verimi ve yıkımı hesaplanmıştır. En büyük ekserji verimin 4116.9 kilowatt ile buhar kazanında meydana geldiği, enerji verimi ise % 44.9 olarak bulunmuştur. Otoklav sisteminde ise 2383.37 kilowatt'lık ekserji yıkımının olduğu ve ekserji verimi ise % 9.21 olarak bulunmuştur. Tüm sistemin enerji ve ekserji akışları oluşturulup sistemdeki ölü hal sıcaklığının artırılması ekserji yıkımındaki azalmaya sebebiyet vereceği sonucuna varmıştır (Çevir, 2014)

Yapılan çalışmada, Uşak Organize Sanayi Bölgesi'nde faaliyet gösteren bir seramik fabrikasında yeralan püskürtmeli kurutucuda atık ısı geri kazanımı amaçlanmıştır. Termodinamik ve ekonomik analiz ile ısı geri kazanımla püskürtmeli kurutucudaki ön ısıtmanın verim ve doğalgaz tüketimine etkisi hesaplanmıştır. Tesisten alınan veriler doğrultusunda atık ısı öncesindeki ve sonrasındaki enerji ve ekserji analizleri yapılmıştır. Projenin geri ödeme süresi Net Şimdiki Değer Yöntemi ile yapılmış olup ekonomik açıdan incelenmiştir. Yapılan çalışmada atık ısı geri kazanım sistemi sonrasındaki enerjinin verimi % 52.97'dan % 53.4'e, ekserjinin verimi ise % 39.46'den % 41.24'e yükseldiği görülmüştür. Yapılan çalışma doğalgazdan toplam % 29 tasarruf edilebileceği, sistemin geri ödeme süresinin 11 ay olduğu, sonrasında tesisin karanca geçeceği hesaplanmıştır (Çağlayan, 2015).

Yapılan çalışmada, enerji yoğun olarak kullanıldığı bir ısı işlem fırınına termodinamik analiz uygulanmıştır. Atmosfer kontrollü ısı işlem fırınına ait kütle, enerji ve ekserji denklıkları tanımlanmıştır. Isıl işlem fırınına ait enerji ve ekserji verimleri hesaplanmıştır. Isıl işlem fırınının enerji verimi % 25.52, ekserji verimi % 19.99 ve ekserji yıkımı % 43.83 bulunmuştur. Yapılan hesaplamalar sonucunda ısı işlem fırınında enerji tasarrufu yapabilmek için iyileştirme yapılabilecek noktalar değerlendirilmiştir (Turgutlu ve Yurddaş, 2015)

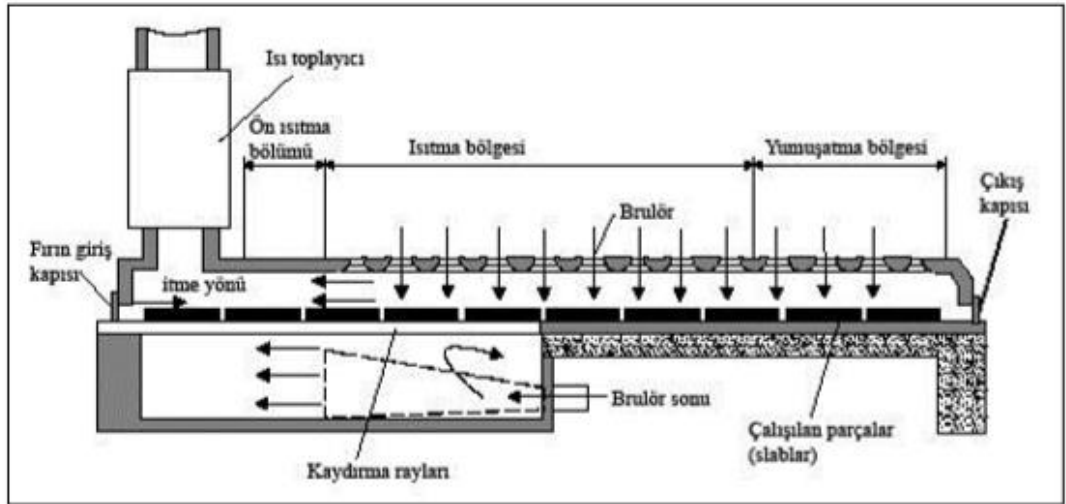
Yapılan çalışmada, bölgesel ısıtma sisteminin işletme verileri kullanılmıştır. Doğalgaz yakıtlı bölgesel ısıtma sisteminde bulunan kazanların atık baca gazının ekserjisi hesaplanmıştır. Bacadan atılan atık gazdaki kayıp ısı kullanılarak bir ısı geri kazanım sistemi tasarlanmıştır. Bu sayede ısı merkezine yakın bir binanın ısıtılması düşünülmüştür. Kazanlardaki adyabatik yanma sıcaklığının 1846 °C, toplam tersinmezlik oranı % 61 ve ekserji verimi % 32.77 olarak hesaplanmıştır. Isıtma sistemindeki baca gazında meydana gelen ekserji yıkımı 868.29 kW ve ekserji yıkım oranında % 6.14 olarak hesaplanmıştır. Isı geri kazanım için tasarlanan ilave ekonomizerin ekserji verimi % 89 ve ekserji yok oluşu 13.4 kW olarak hesaplanmıştır. Enerji iletim hatlarında meydana gelen ekserji yıkımı 3.35 kW hesaplanmıştır. Isı geri kazanım için tasarlanan sistemin uygulanması sonucunda sistemde % 3.38 oranında bir ekserji kazancı olacağı hesaplanmıştır (Çomaklı ve Terhan, 2015).

Yapılan çalışmada, yüksek enerji sarfiyatına sahip bir emaye pişirme fırınına termodinamik analiz uygulanmıştır. Fırının enerji ve ekserjisi bulunarak enerjide meydana gelebilecek geri kazanım miktarı bulunmuştur. Hesaplama sonucunda fırının enerji verimi % 13 ve ekserji verimi % 9 bulunmuştur. Emaye pişirme fırınında yapılabilecek iyileştirme sonucunda enerji veriminin % 28 ve ekserji veriminin % 20.3'e çıkabileceği öngörülmüştür. Yapılan termodinamik analizler sonucunda sistemde enerjinin verimli kullanımı ve performansın arttırılmasına ilişkin önerilerde bulunulmuştur (Vatandaş, 2016).

3. ENDÜSTRİYEL TAV FIRINI

3.1 Tav Fırınının Özellikleri

Demir Çelik haddehanelerinde gerçekleştiren sıcak hadde prosesinde çelik girdileri (kütükler) 1050 ile 1300 °C' ye kadar ısıtılarak tavlanamaktadır. Tavlana sonucunda kütüğün haddelenerek şekillendirilmektedir. Malzemenin istenilen şekilde haddelenebilmesi için tavlana ürünlerdeki bölgesel ısı dağılımının eşit ve düzenli olması gerekmektedir. Malzeme üzerine ısıyı eşit olarak dağıtabilmek için, tav fırınlarını sıcaklık bölgelerine ayrılmaktadır. Tav fırını ısı bölgelerinde ihtiyaç duyulan ısı enerji ihtiyacı brülör diye adlandırılan ekipmanlar ile sağlanmaktadır. Brülörlerin girdisi petrol ürünlerinden (doğalgaz, fuel oil vb.) sağlanmaktadır. Tav fırınında oluşan ısı enerji ısı transferi yoluyla mamüllerin istenilen tavlama sıcaklığına ulaşmasını sağlar. Fırın içerisindeki ürünler hareketli taban (hareketli kiriş vb. sistemler) yardımıyla hareket etmektedir. Endüstriyel fırının kapasitesi, bir saatte tavlayabileceği çeliğin tonajı ile belirlenir. Ayrıca tavlana ürünün maksimum referans ölçüleride (en, yükseklik ve boy) fırın kapasitesinin önemli etkenlerinden biridir. Tav fırınına ait örnek görsel Şekil 3.1' de verilmiştir.



Şekil 3.1 Tav fırınına ait örnek (AB, 2001)

Tav fırınlarında yanma sonucunda oluşan atık gazın sıcaklığından faydalanılarak fırınlarda enerji tasarrufu sağlanmaktadır. Fırın içerisinde oluşan ısı fırın

ekipmanlarında ısıtmaktadır. Fırına ait ekipmanları oluşan ısıdan koruma için açık ve kapalı devre su sistemleri kullanılmaktadır.

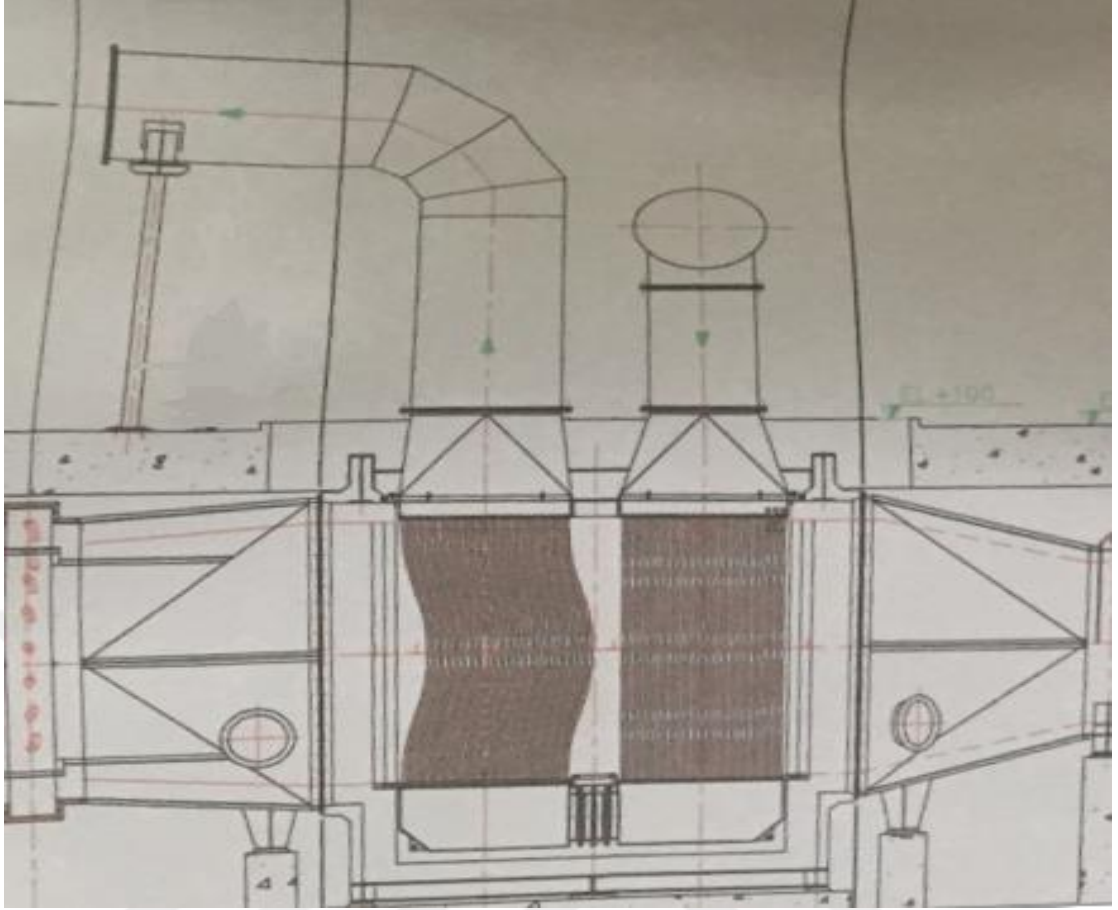
3.1.1. Tav fırını çalışma prensibi

Haddehanelerde kullanılan tav fırınları, kütüklerin şekil değiştirebilmesi için tavlama sıcaklığına kadar ısıtıldığı endüstriyel fırınlardır. Tav fırınları otomatik ve/veya manuel olarak kumanda edilmektedir. Endüstriyel tav fırınlarına kütükler genellikle role diye adlandırılan döner ekipmanlar ile girmektedir. Fırın içerisindeki kütükler hareketli taban, hareketli kiriş vb. sistemler ile fırın içerisinde hareket etmektedir. Tav fırınlarında ilk giren ilk çıkar mantığında çalışmaktadır. Tav Fırın içerisinde haddeleme sıcaklığına ulaşan malzemeler sırasıyla yardımcı (itici sistem, king off vb. sistemlerin) ekipmanların desteği ile haddelenmek üzere fırın dışına çıkarılmaktadır.

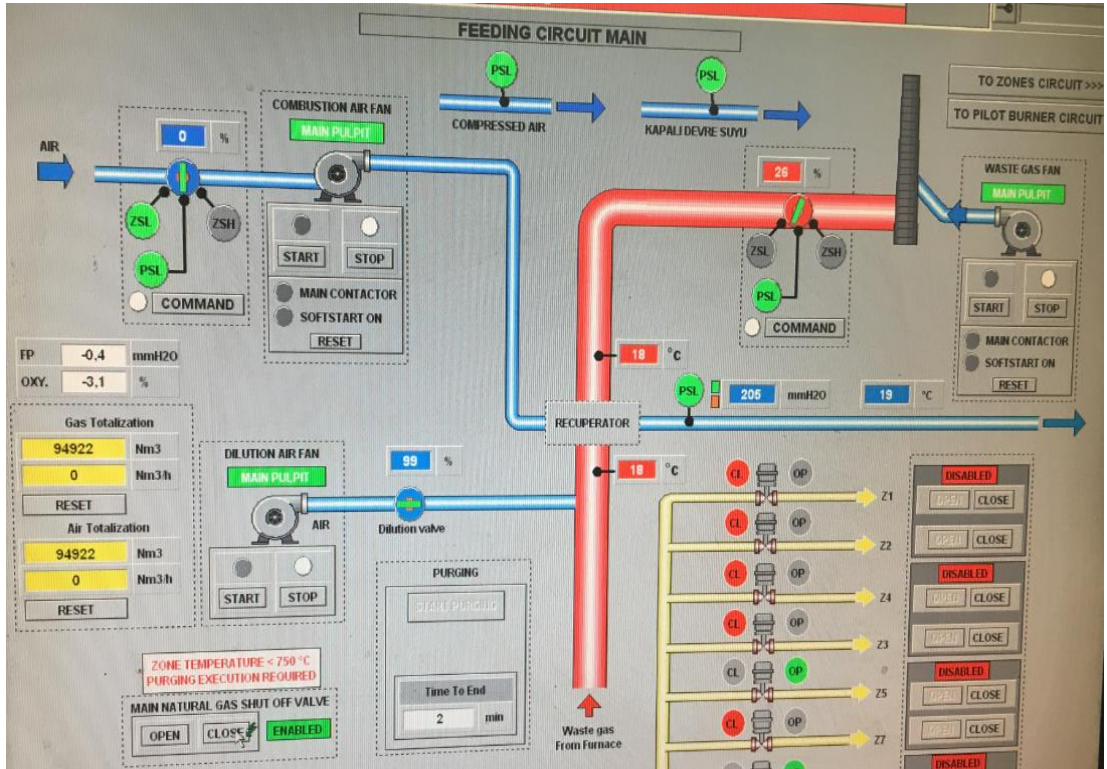
3.1.2.Tav fırını reküperatör özelliği

Reküperatörler, baca gazındaki atık ısınn yakma havasına aktarıldığı ısı değiştiricilerdir. Reküperatörlerde yakma havası borular içinden geçerken, baca gazı bu borular arasından; aynı doğrultuda, karşı doğrultuda veya çapraz doğrultuda geçebilirler. Baca gazında bulunan ısıyı yanma havasına transfer etmektedir. Reküperatöre ait montaj resmi şekil 3.2 de verilmektedir.

Reküperatördeki borular ısıya dayanıklı özel alaşımlı elik malzemelerden imal edilmektedirler. Ancak zamanla, baca gazının aşındırıcı etkisinden dolayı bu borular zarar görmekte ve yüksek basınçlı ortamdan düşük basınçlı ortama doğru sızıntı miktarları artmaktadır. Taze hava hattında basma fanı (pozitif basınç) ve baca gazı hattında cebri çekme olduğu için sızıntı yönü yüksek basınçlı taze hava hattından, düşük basınçlı baca gazı hattına doğru olmaktadır. Reküperatörlerde bulunan muhtemel hava kaçak miktarlarının bulunması için, reküperatör öncesinde ve sonrasında gaz kompozisyonu analizinin yapılması gerekmektedir. Reküperatörlerin genel kontrol panaline ait fotoğraf şekil 3.3 de verilmiştir.



Şekil 3.2 Reküperatör

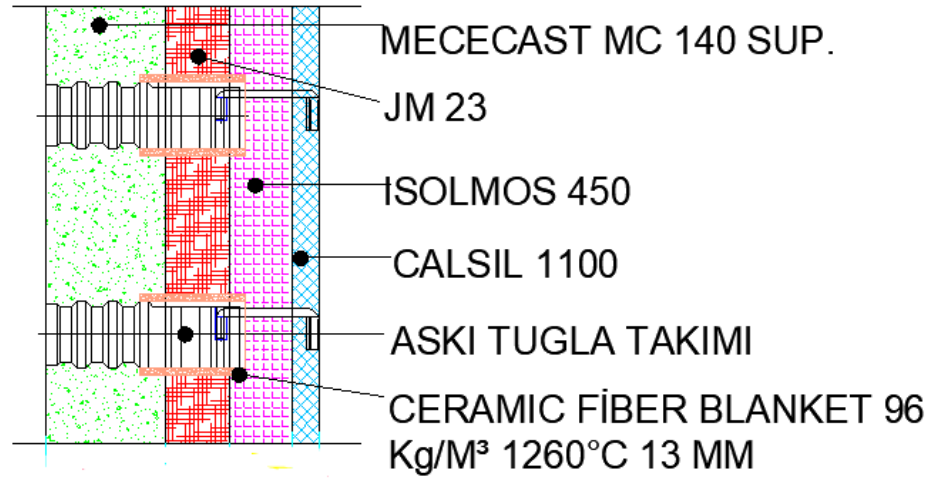


Şekil 3.3 Reküperatör kontrol paneli

3.1.3. Tav fırını duvarının özellikleri

Tav fırını içerisinde oluşan ısınnın belirli bir sıcaklıkta tutulması enerji verimliliğinde önemli bir yere sahiptir. Fırın yüzeylerindeki enerji kayıpları iletim, taşınım ve radyasyondan kaynaklanmaktadır. Bu kayıpları minimize etmek için yüksek sıcaklık dayanımı olan ve düşük iletim katsayısına sahip özel imal edilen yalıtım malzemeleri kullanılmaktadır. Fırın dış yüzey sıcaklığının, dış ortam sıcaklığından yaklaşık 30 °C seviyesinde tutulması kayıpları minimize etmek için yeterli olduğu öngörülmektedir.

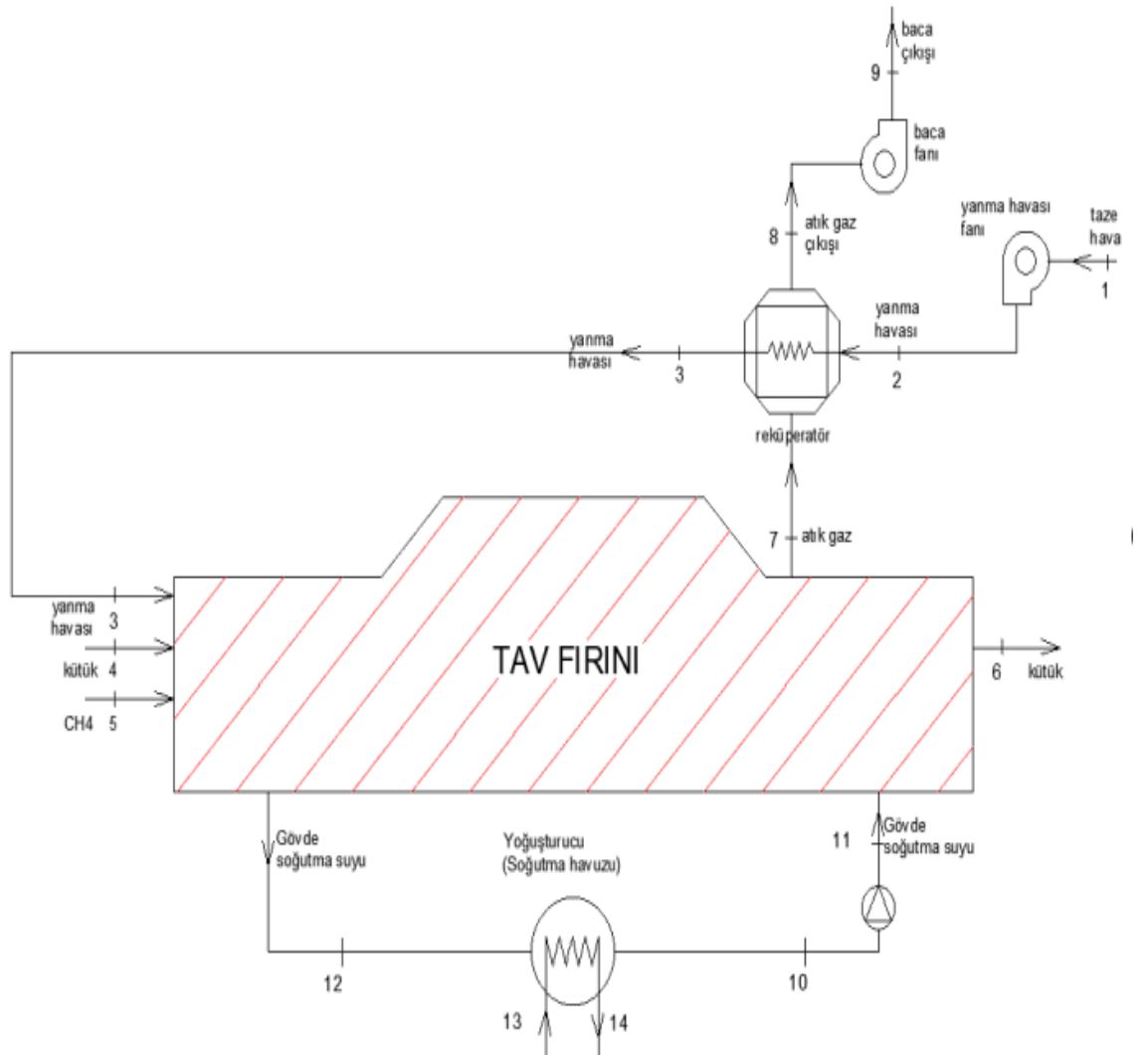
Tav fırını duvarını oluşturan yalıtım malzemelerinin örnek gösterimi Şekil 3.4. de verilmiştir.



Şekil 3.4. Tav fırını duvar kesiti

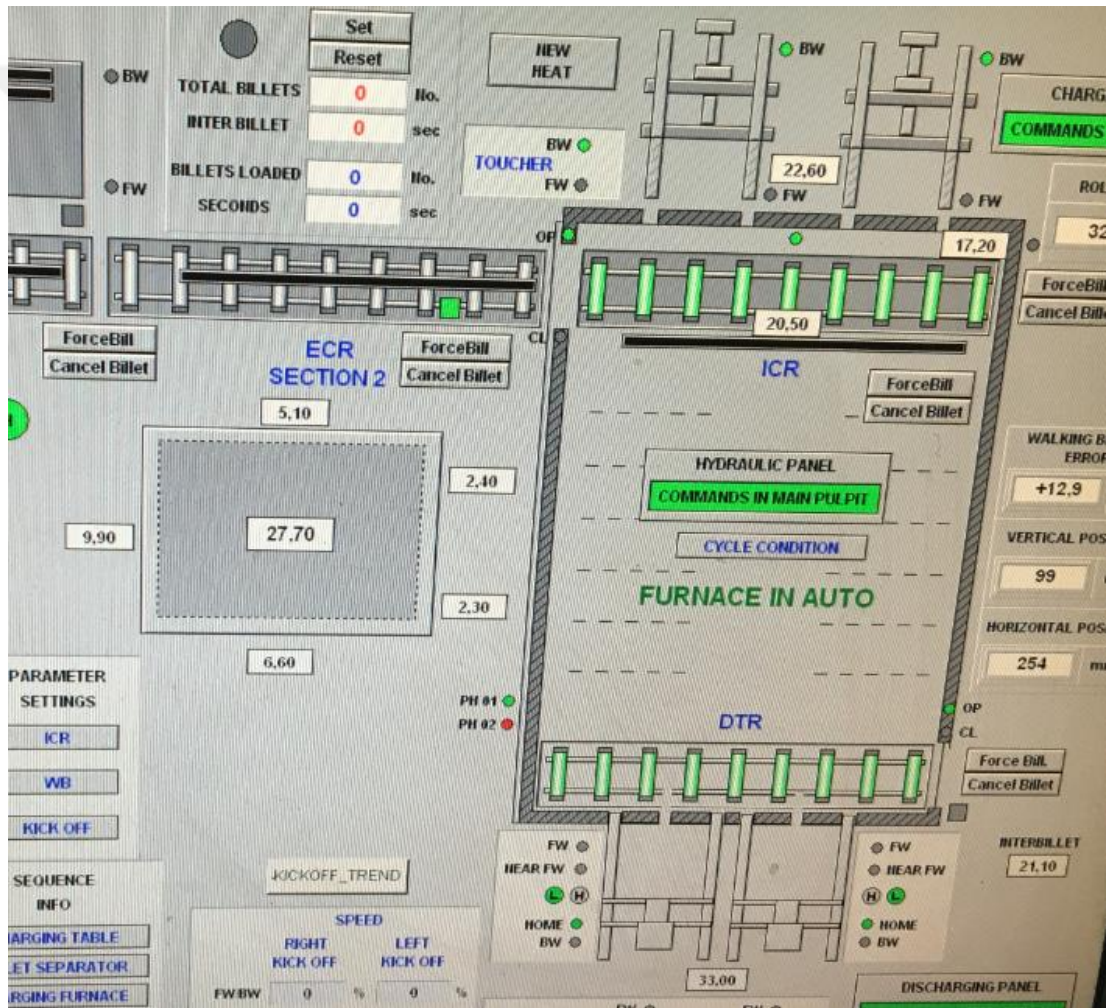
4. TAV FIRINI TERMODİNAMİK ANALİZ

İzmir ili sınırlarında bulunan bir demir çelik fabrikasındaki çubuk demir üretimi yapılan haddehanedeki tav fırınının termodinamik analizi yapılmıştır. Haddehanedeki tav fırını 180 ton/saat kapasiteye sahiptir. Fırının genişliği 12,80 metre ve uzunluğu 24 metredir. Fırın içerisine giren kütük maksimum 180 mm'lik bir referansa sahip olmalıdır. Endüstriyel tav fırını 95 adet kütük alma kapasitesine sahiptir. Endüstriyel tav fırınına ait, fırın içi yanma havasını sağlayan yanma havası fan sistemi, fırın içerisinden çıkan atık gaz sıcaklığını yanma havasına transferini sağlayan reküperatör sistemi, reküperatör sonrasında ısısı düşmüş atık baca gazının bacadan atılmasını sağlayan baca fanı sistemi, fırın ve yardımcı ekipmanlardaki ısının düşürülmesi için kullanılan açık ve kapalı devre soğutma sisteminden oluşmaktadır. Tav fırını akış şeması Şekil 4.1' de verilmiştir.



Şekil 4.1 Endüstriyel tav fırını akış diyagramı

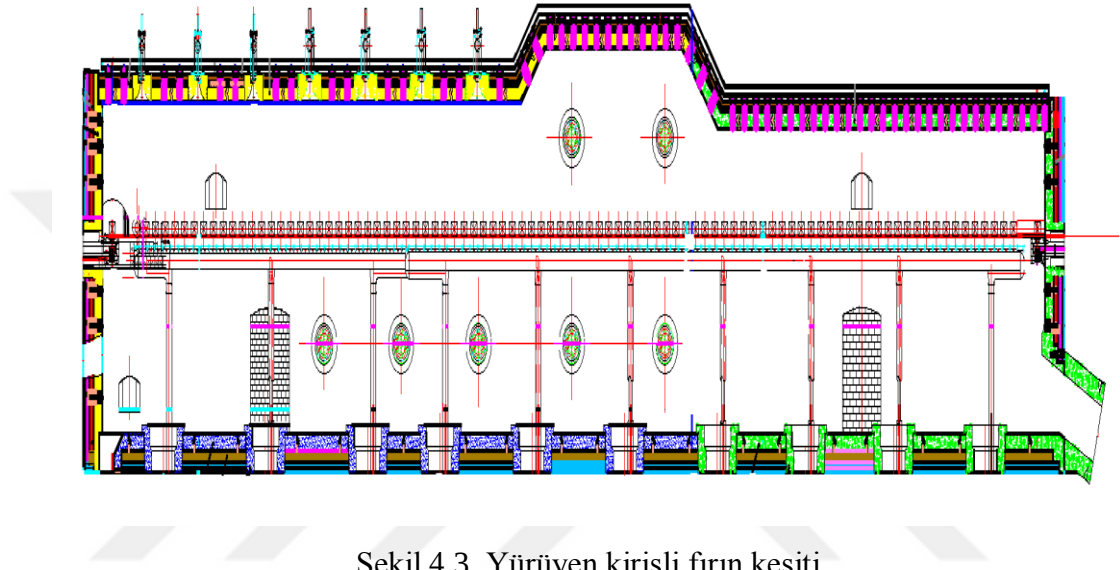
Fırın içerisine kütükler fırın giriş rolesi olarak adlandırılan döner taşıyıcı ekipmanlar yardımıyla girmektedir. Döner ekipmanlar üzerinde fırına giren kütükler itici olarak adlandırılan ekipman yardımıyla fırın tabanına konulmaktadır. Fırın içerisinde yürüyen kirişler yardımıyla hareket eden kütükler fırın çıkış bölgesine geldiğinde King-Off diye adlandırılan taşıyıcı ekipman yardımı ile fırın çıkış röleleri üzerine alınmaktadır. Fırın içerisinde hareket eden roleler kapalı devre soğutma suyu sistemi ile soğutulmaktadır. Fırın giriş ve çıkış rolelerinin fırın içerisindeki yerleşimi Şekil 4.2’de verilmiştir. Fırın çıkış röleleri yardımıyla fırın dışına çıkarılan kütükler istenilen ebatta işlenilmek üzere haddelenmektedir.



Şekil 4.2 Fırın giriş çıkış role yerleşimi

İnceleme yapılan endüstriyel tav fırını yürüyen kirişli tabanlara sahiptir. Tav fırını içerisinde dört adet hareketli ve beş adet sabit olmak üzere dokuz adet kiriş

bulunmaktadır. Yürüyen kirişli tabanlar sırasıyla yukarı, ileri, aşağı ve geri hareketlerini senkronize olarak yapmaktadır. Yürüyen kirişli tabanlar senkronize olarak yapmış olduğu hareketleri hidrolik olarak çalışan pistonlar yardımıyla gerçekleştirmektedir. Tav fırını içerisinde bulunan sabit ve hareketli kirişler açık devre olarak adlandırılan sulu soğutma sistemi yardımıyla soğutulmaktadır. Hareketli kirişler fırın içerisine giren kütüklerin fırın içerisinde hareket etmesini sağlamaktadır. Şekil 4.3’de yürüyen kirişli fırın görseli verilmektedir.



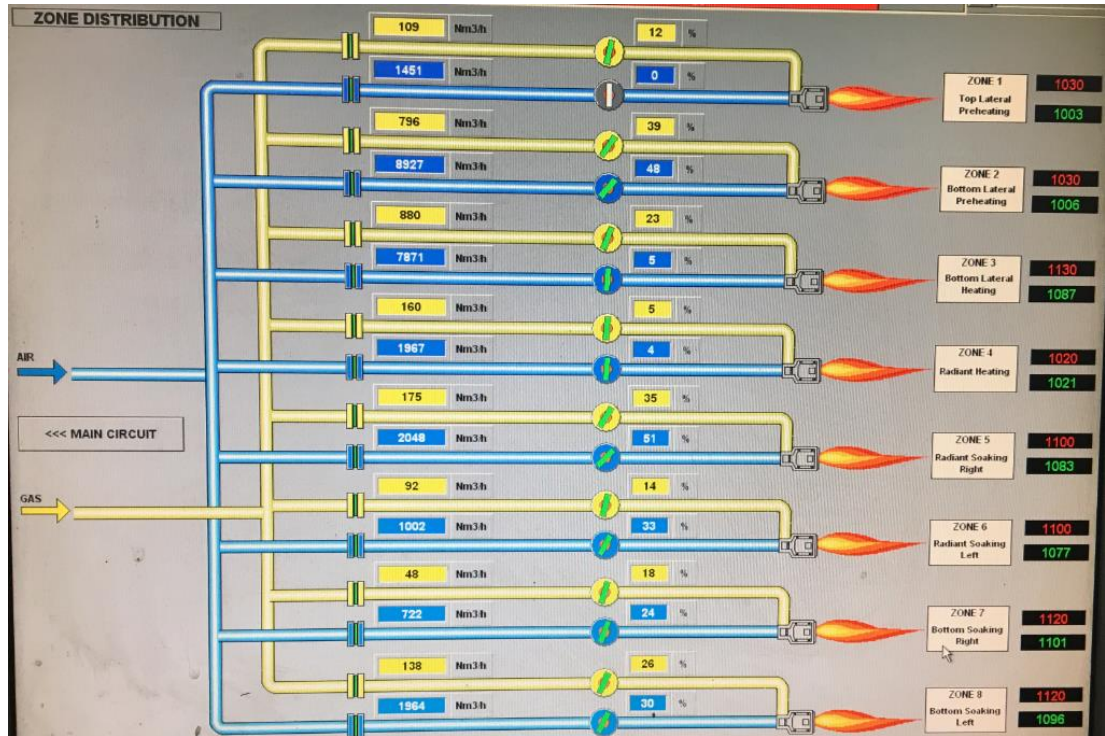
Şekil 4.3. Yürüyen kirişli fırın kesiti

Endüstriyel tav fırınında meydana gelen ısınnın kütüğe doğrusal olarak verilmesi gerekmektedir. Bu sebeple fırın kendi içerisinde 8 ısı bölgesine ayrılmıştır. Fırın içerisindeki ısıll bölgeler yardımıyla kütüğe homejen dağılımlı ısı enerjisi verilmektedir. Isı bölgelerinde ihtiyaç duyulan ısıll enerji doğalgaz ile çalışan 79 adet brülör aracılığı ile sağlanmaktadır. Tav fırınındaki farklı bölgelere yerleştirilmiş 14 adet 250 kW, 9 adet 140 kW, 32 adet 90 kW ve 24 adet 45 kW’lık brülör bulunmaktadır. Fırın için ısıll bölgelerde bulunan farklı ısıll güce sahip brülörler yardımıyla fırın içi sıcaklık ayarlaması yapılmaktadır. Fırın içerisinde yapılan sıcaklık ayarlamasında 1. ve 2. bölge de ön tavlama işlemi, 3., 4., 7., ve 8. bölgelerde orta tavlama işlemi ve 5. ve 6. bölgelerde ısınnmış olan kütüğün düzeltici tavlama işlemi yapılmaktadır. Yani fırın içindeki ısınnın kütüğe homojen olarak yayıldığı kısımdır. Endüstriyel tav fırınındaki ısıll bölgelerine ait brülörlerin yerleşimleri Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1 Tav fırını brülör yerleşim

Bölge	Brülör Özelliği	Adet	Bulunduğu Alan
1	250 kW	4	Arka 2 yan kiriş ve üst duvarda
2	250 kW	4	Arka 2 yan kiriş ve alt duvarda
3	250 kW	6	Orta 2 yan kiriş ve alt duvarda
4	90 kW	32	Arka üst tavanda
5	45 kW	12	Ön üst sağ duvarda
6	45 kW	12	Ön üst sol duvarda
7	140 kW	5	Alnında kiriş alt sol duvarda
8	140 kW	4	Alnında kiriş alt sağ duvarda

Şekil 4.4’de Endüstriyel tav fırını ısı bölge kontrol panelinin fotoğrafı verilmiştir.



Şekil 4.4 Tav fırını ısı bölgesi kontrol panel görüntüsü

4.1. Denge Denklemleri

Bu bölümde, termodinamik yasalara bağlı olarak bazı tanımlayıcı açıklamalar endüstriyel tav fırını sisteminin analizi için verilmiştir. Tav fırını analizinde sırasıyla kütle, enerji ve ekserji denge denklemlerini kapsayan ilkeler tav fırınındaki iyileştirme potansiyelini araştırmak için incelenmiştir (Dincer, 2012). Herhangi bir sistemin termodinamik analizinde kütle denge analizi, kullanılan temel bir ilkedir. Sistemin kararlı hal durumu için kütle dengesi aşağıdaki gibi verilebilir.

$$\sum \dot{m}_g = \sum \dot{m}_\zeta \quad (4.1)$$

Burada “g” ve “ç” alt indisleri sırasıyla sisteme giren ve çıkan madde akımını göstermektedir. Enerji denge denklemi uygulanan prosesin değişim özelliğini açıklamada uygulanır. İncelemesi yapılan prosesin enerji dengesi termodinamiğin birinci yasasına göre sistem içinde korunur. Kinetik ve potansiyel enerji etkilerinin ihmal edilmesiyle kararlı hal şartları için enerji denge denklemi aşağıdaki gibi verilir (Bejan, 1996).

$$\dot{Q} + \sum \dot{m}_g h_g = \dot{W}_{net} + \sum \dot{m}_\zeta h_\zeta \quad (4.2)$$

Ekserji analizi, enerji kaynaklarının ekonomik ve etkin kullanımı için stratejiler oluşturmada destekleyicidir ve enerji üretim sistemlerinin dizaynlarının incelenmesinde kullanılmaktadır. Sistemin termodinamik analizi için kullanılan ekserji denge denklemi aşağıdaki gibi verilir (Dincer, 2012).

$$\sum_g \dot{m}_g ex_g + \dot{E}_{xQ} = \sum_\zeta \dot{m}_\zeta ex_\zeta + \dot{E}_{xW} + \dot{E}_{xY} \quad (4.3)$$

Burada $\dot{E}_x$ ekserji transfer hızı, $\dot{E}_{xQ}$ ısı transfer hızının ekserjisi ve $\dot{E}_{xW}$ iş ile alakalı ekserji transfer hızıdır. Ekserji yıkımı $\dot{E}_{xY}$ ile ifade edilmektedir. ex prosesin spesifik ekserjisidir. Bu kavramlar aşağıdaki şekilde ifade edilir;

$$\dot{E}_{xQ} = \left(1 - \frac{T_o}{T_g}\right) \dot{Q}_g \quad (4.4)$$

$$\dot{E}x_W = \dot{W} \quad (4.5)$$

$$ex = ex_{ke} + ex_{pe} + ex_{ph} + ex_{ch} \quad (4.6)$$

Burada, ex_{ke} , ex_{pe} , ex_{ph} ve ex_{ch} sırasıyla kinetik, potansiyel, fiziksel ve kimyasal ekserjidir. Kinetik ve potansiyel ekserjiler ihmal edilebilir olduğundan, fiziksel ekserji şu şekilde ifade edilebilir;

$$ex_{ph,i} = (h_i - h_o) - T_o(s_i - s_o) \quad (4.7)$$

Kimyasal ekserji ise maddenin kimyasal dengesinden kimyasal yapısının uzaklığı ile bağlantılıdır. Yakıtların spesifik kimyasal ekserjileri molar kimyasal ekserji (ξ_i) ve ilgili yakıtın alt ısı değeri (LHV_y) kullanılarak tanımlanır (Szargut, 1987).

$$\dot{E}x_{km}^y = \xi_i LHV_y \quad (4.8)$$

İdeal gazların kimyasal ekserji içerikleri şu şekildedir;

$$ex_{ch} = ex_{ch}^o + R_u T_o \ln z_i \quad (4.9)$$

Burada z_i i numaralı bileşenin mol kesrini ve ex_{ch}^o verilen referans sıcaklık ve basınçta molar kimyasal ekserjidir ve şu şekilde ifade edilir;

$$ex_{ch}^o = \frac{T_o}{T} ex_{o,i}^{ch} - \bar{h}_f^o \frac{T - T_o}{T} \quad (4.10)$$

Burada, $ex_{o,i}^{ch}$, $\bar{h}_f^o$ ve T sırasıyla “i” numaralı kimyasal bileşenin standart molar kimyasal ekserjisi, oluşum entalpisi ve gazlaştırma sıcaklığıdır. Materyal akışının ekserjisi aşağıda verildiği gibidir;

$$\dot{E}x_i = \dot{m} ex_i \quad (4.11)$$

Doğal gazın özgül kütlesi sabit kabul edilerek; hacimsel debi, özgül kütle ve doğal gazın kütleli debisi aşağıda verilmiştir.

$$\dot{V}_{dg} = \frac{V_{dg}}{t} \quad (4.12)$$

$$\rho_{dg} = \rho_h S G_{dg} \quad (4.13)$$

$$\dot{m}_{dg} = \dot{V}_{dg} \rho_{dg} \quad (4.14)$$

Doğal gazın alt ısı değeri ve sisteme giriş sıcaklığı sabit kabul edilerek doğalgaz ile giren enerji denklemini aşağıda verilmiştir.

$$\dot{Q}_{dg} = \dot{m}_{dg} (LHV_{dg} + C_{dg} x T_{dg}) \quad (4.15)$$

Doğal gazın ekserji denklemi aşağıda verilmiştir. Doğal gaz için kimyasal ekserji katsayısı 1,04 seçilmektedir (Kotas, 1995).

$$\dot{E}_{dg}^{kim} = \dot{m}_{dg} \varphi LHV_{dg} \quad (4.16)$$

4.1.1. Tav fırını denge denklemleri

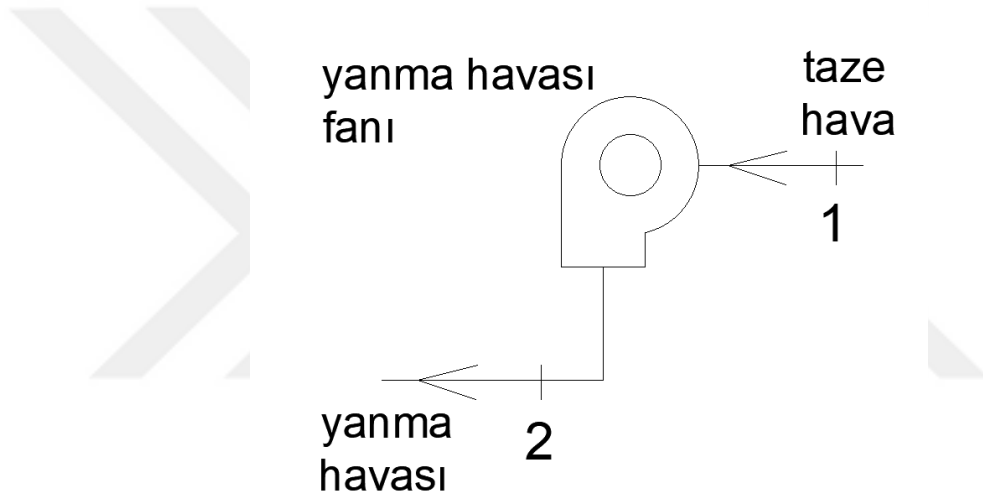
Ekserji analizi bakış açısından hareketle alternatif enerji kaynakları tarafından desteklenen entegre sistemin performansını değerlendirmek için sistem ile sistemin tüm bileşenlerinin hem ürün ve hem de girdi ilişkisinin belirlenmesi gereklidir. Yukarıdaki kabullere bağlı olarak tav fırını akış diyagramının bileşenleri için enerji ve ekserji analiz ifadeleri aşağıdaki verilmiştir.

Fırına giren sıcak yanma havası 400 kW'lık kurulu güce sahip bir fan sistemi ile sağlanmaktadır. Yanma havası fan sistemine ait teknik özellikler Çizelge 4.2'de verilmiştir. Yanma hava fanın giriş ve çıkış kısımlarına titreşim önleyici ekipmanlar ile bağlanmıştır.

Çizelge 4.2. Yanma fanı özellikleri

Kapasitesi	95000 Nm ³ /h (20 °C)
Statik Basınç	1000 mm. w.c.
Fan Devir Sayısı	1450 r.p.m.
Kurulu Güç	400 kW

Yanma havası fan sistemine ait giren ve çıkan akımlar Şekil 4.5’ de gösterilmiştir. Ayrıca yanma havası fan sistemine ait kütle, enerji, entropi ve ekserji dengeleri aşağıdaki eşitliklerde verilmiştir.



Şekil 4.5. Tav fırını yanma havası fanı

$$\text{Kütle} \quad : \dot{m}_1 = \dot{m}_2 \quad (4.17a)$$

$$\text{Enerji} \quad : \dot{m}_1 h_1 + W_{yhf} = \dot{m}_2 h_2 \quad (4.17b)$$

$$\text{Entropi} \quad : \dot{m}_1 s_1 + \dot{S}_{\text{üretim}, yhf} = \dot{m}_2 s_2 \quad (4.17c)$$

$$\text{Ekserji} \quad : \dot{m}_1 ex_1 + W_{yhf} = \dot{m}_2 ex_2 + \dot{E}_{\text{yıkım}, yhf} \quad (4.17d)$$

Sisteme giren ve sistemden çıkan havanın kimyasal bileşenleri Çizelge 4.3’de verilmiştir.

Çizelge 4.3. Havanın kimyasal özellikleri

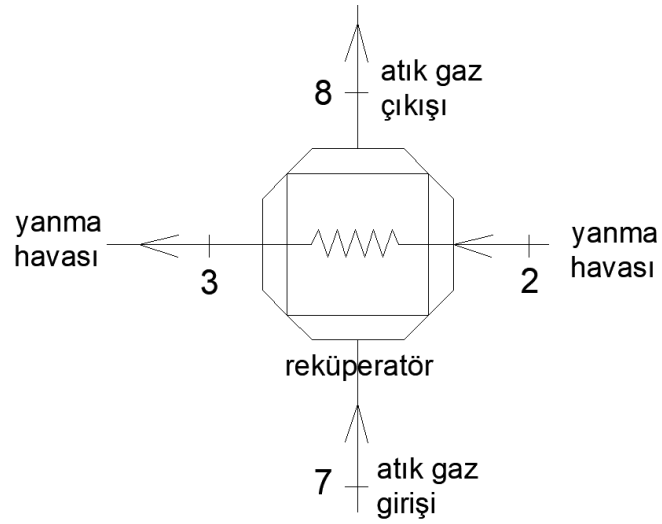
Yanma Havaşı	Mol Ağırlığı (kg/kmol) M	Kütle Yüzdesi (%) Y	Kütlesel Debi (kg/s) $\dot{m}$
N ₂	28,013	0,79	17,2
O ₂	31,999	0,21	4,57
Toplam		1	21,77

Endüstriyel tav fırınına giren yanma havasını ısıtmak için baca gazı akışına paralel olarak dizayn edilmiş boru demetleri kullanılmaktadır. Boru demetleri içerisinden geçen yanma havası baca atık gaz ısını alarak tav fırınına girmektedir. Atık gaz ısını yanma havasına veren reküperatöre ait teknik özellikler Çizelge 4.4’ de verilmiştir.

Çizelge 4.4. Reküperatör teknik özellikleri

Atık Gaz Giriş Sıcaklığı	750 °C (max. 850 °C)
Atık Gaz Hacmi	80000 Nm ³ /h
Hava Hacmi	85000 Nm ³ /h
Yanma Havaşı Giriş Sıcaklığı	20 °C
Yanma Havaşı Çıkış Sıcaklığı	450 °C

Reküperatöre ait giren ve çıkan akımlar Şekil 4.6’ da gösterilmiştir. Ayrıca reküperatöre ait kütle, enerji, entropi ve ekserji dengeleri aşağıdaki eşitliklerde verilmiştir.



Şekil 4.6. Reküperatör

$$\text{Kütle} \quad : \dot{m}_2 + \dot{m}_7 = \dot{m}_3 + \dot{m}_8 \quad (4.18a)$$

$$\text{Enerji} \quad : \dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_7 h_7 = \dot{m}_3 h_3 + \dot{m}_8 h_8 \quad (4.18b)$$

$$\text{Entropi} \quad : \dot{m}_2 s_2 + \dot{m}_7 s_7 + \dot{S}_{\text{üretim, reküperatör}} = \dot{m}_3 s_3 + \dot{m}_8 s_8 \quad (4.18c)$$

$$\text{Ekserji} \quad : \dot{m}_2 ex_2 + \dot{m}_7 ex_7 = \dot{m}_3 ex_3 + \dot{m}_8 ex_8 + \dot{E}x_{\text{yıkım, reküperatör}} \quad (4.18d)$$

Yanma havasını ısıtarak enerji verimliliği sağlayan reküperatörden geçen atık baca gazının özellikleri Çizelge 4.5’de verilmiştir.

Çizelge 4.5. Baca gazı özellikleri

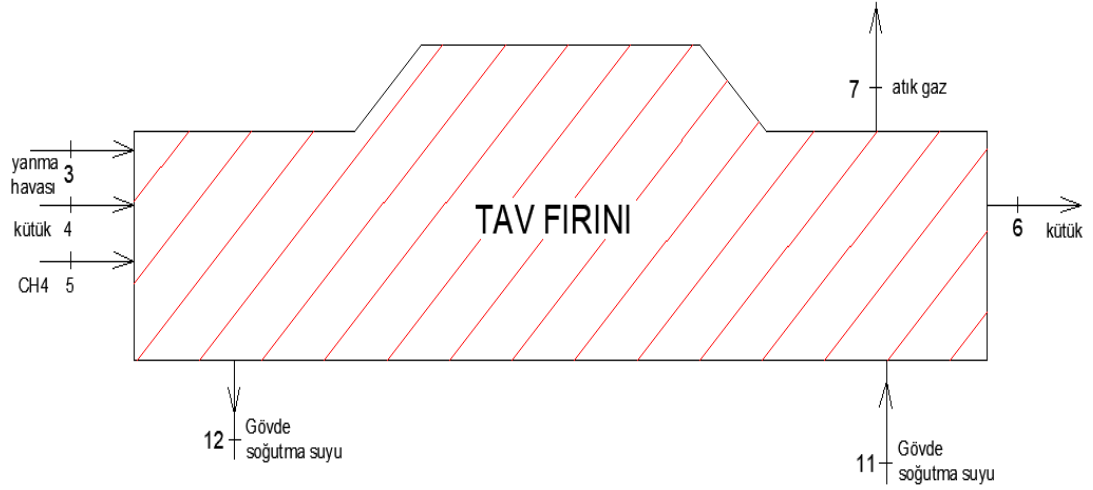
Parametreler		1. Ölçüm	2. Ölçüm	3. Ölçüm	Ortalama
Azot Monoksit (NO)	Ppm	57,00	58,00	60,00	58,33
	mg/Nm ³	76,34	77,68	80,36	78,13
Azot Dioksit (NO ₂)	Ppm	2	3	3	2,67
	mg/Nm ³	4,11	6,16	6,16	5,48
Azot Dioksit (NO _x) ^x	mg/Nm ³	121,16	125,27	129,38	125,27
İslilik	Bacharach Skalası	1	1	1	1

Baca gazına ait kimyasal özellikler Çizelge 4.5’de verilmiştir.

Çizelge 4.6. Baca gazının kimyasal özellikleri

Yanma Gazları		Mol Ağırlığı (kg/kmol)	Kütle Yüzdesi (%)	Kütlesel Debi (kg/s)
Bileşik	Formül	M	Y	m
Nitrojen	N ₂	28,01	0,7612	11,299
Su Buharı	H ₂ O	18,016	0,0494	0,733
Oksijen	O ₂	15,999	0,1247	1,851
Karbondioksit	CO ₂	44,009	0,0647	0,96
Toplam			1	14,8436

Üretilecek olan çeliğin haddeleme sıcaklığına sahip olması için doğalgazdan aldığı enerjiyi kütüklere veren sistemdir. Sistemde doğalgazın yanmasıyla açığa çıkan atık gaz, reküperatör aracılığıyla ısını yanma havasına vermektedir.



Şekil 4.7. Endüstriyel tav fırını

Endüstriyel tav fırınına ait giren ve çıkan akımlar Şekil 4.7’ de gösterilmiştir. Ayrıca tav fırınına ait kütle, enerji, entropi ve ekserji dengeleri aşağıdaki eşitliklerde verilmiştir.

$$\text{Kütle} \quad : \dot{m}_3 + \dot{m}_4 + \dot{m}_5 + \dot{m}_{11} = \dot{m}_6 + \dot{m}_7 + \dot{m}_{12} \quad (4.19a)$$

$$\text{Enerji} \quad : \dot{m}_3 h_3 + \dot{m}_4 h_4 + \dot{m}_5 h_5 + \dot{m}_{11} h_{11} = \dot{m}_6 h_6 + \dot{m}_7 h_7 + \dot{m}_{12} h_{12} \quad (4.19b)$$

$$\text{Entropi} \quad : \dot{m}_3 s_3 + \dot{m}_4 s_4 + \dot{m}_5 s_5 + \dot{m}_{11} s_{11} + \dot{S}_{\text{üretim,fırın}} = \dot{m}_6 s_6 + \dot{m}_7 s_7 + \dot{m}_{12} s_{12} \quad (4.19c)$$

$$\text{Ekserji} \quad : \dot{m}_3 ex_3 + \dot{m}_4 ex_4 + \dot{m}_5 ex_5 + \dot{m}_{11} ex_{11} = \dot{m}_6 ex_6 + \dot{m}_7 ex_7 + \dot{m}_{12} ex_{12} + \dot{E}x_{\text{yıkım,fırın}} \quad (4.19d)$$

Endüstriyel tav fırınında tavlanan kütüğe ait kimyasal bileşenler Çizelge 4.7’ de verilmiştir.

Çizelge 4.7. SAE 1008 kütüğünün kimyasal bileşenleri

SAE 1008	Mol Ağırlığı (kg/kmol) M	Kütle Yüzdesi (%) Y	Kütlesel Debi (kg/s) m
Karbon (C)	12,01	0,10	5,04
Silisyum (Si)	28,08	0,30	15,65
Mangan (Mn)	54,90	0,51	26,79
Fosfor (P)	31,00	0,04	2,12
Kükürt (S)	32,00	0,05	2,39
Kurşun (Pb)	207,20	0,02	1,06
Toplam		1,00	53,06

Tav Fırınına giren doğalgazın kimyasal bileşenler Çizelge 4.8’ da teknik özellikleri ise Çizelge 4.9’de verilmiştir.

Çizelge 4.8 Doğalgazın kimyasal bileşenleri

Doğalgaz		Mol Ağırlığı (kg/kmol) M	Kütle Yüzdesi (%) Y	Kütlesel Debi (kg/s) m
Bileşik	Formül			
Metan	CH ₄	16,043	0,9300	0,59055
Etan	C ₂ H ₆	30,070	0,0300	0,01905
Propan	C ₃ H ₈	44,097	0,0130	0,008255
Azot	N ₂	28,013	0,0270	0,017145
Toplam			1,0000	0,635

Çizelge 4.9. Doğalgazın teknik özellikleri

Özellik	Tanımı	Değeri
SG	Spesifik Gravite	0,60274
ρ	Özgül Kütle	0,738357 kg/m ³
LHV	Alt Isıl Değer	45000 kJ/kg
c	Isı Kapasitesi	2 kJ/kgK
ϕ	Kimyasal Eksereji Katsayısı	1,04

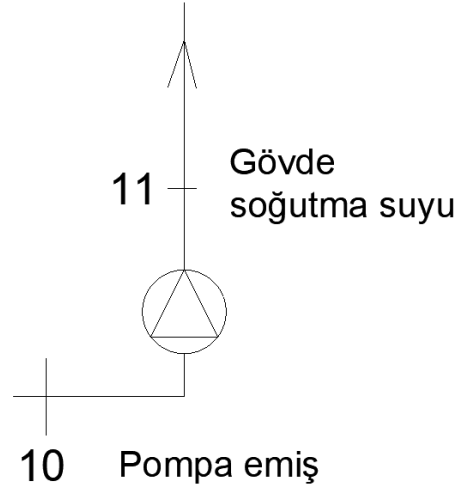
Tav fırınına giren yanma havasının kimyasal bileşenleri Çizelge 4.10’de verilmiştir.

Çizelge 4.10. Yanma havasının kimyasal bileşenleri

Yanma Havası	Mol Ağırlığı (kg/kmol) M	Kütle Yüzdesi (%) Y	Kütlesel Debi (kg/s) $\dot{m}$
N ₂	28,013	0,79	17,20
O ₂	31,999	0,21	4,57
Toplam		1	21,77

Tav fırınında gerçekleşen yanma ile ısınan sistemdeki sabit ve yürüyen kirisler, kamera sistemi, fırın giriş çıkış roleleri v.b. ekipmanların soğutulması için sistemin 580 m³/h ‘lık soğutma suyuna ihtiyacı vardır. Mevcut su ihtiyacı tav fırını soğutma suyu giriş çıkış suyu arasındaki fark 15 °C olacak şekilde üretici firma tarafından hesaplanmıştır.

Soğutma suyu pompasına ait giren ve çıkan akımlar Şekil 4.8’ de gösterilmiştir. Ayrıca soğutma suyu pompasına ait kütle, enerji, entropi ve ekserji dengeleri aşağıdaki eşitliklerde verilmiştir.



Şekil 4.8. Soğutma suyu pompası

$$\text{Kütle} \quad : \dot{m}_{10} = \dot{m}_{11} \quad (4.20a)$$

$$\text{Enerji} \quad : \dot{m}_{10}h_{10} + W_{pompa} = \dot{m}_{11}h_{11} \quad (4.20b)$$

$$\text{Entropi} \quad : \dot{m}_{10}s_{10} + \dot{S}_{\text{üretim,pompa}} = \dot{m}_{11}s_{11} \quad (4.20c)$$

$$\text{Ekserji} \quad : \dot{m}_{10}ex_{10} + W_{pompa} = \dot{m}_{11}ex_{11} + \dot{E}_{\text{yıkım,pompa}} \quad (4.20d)$$

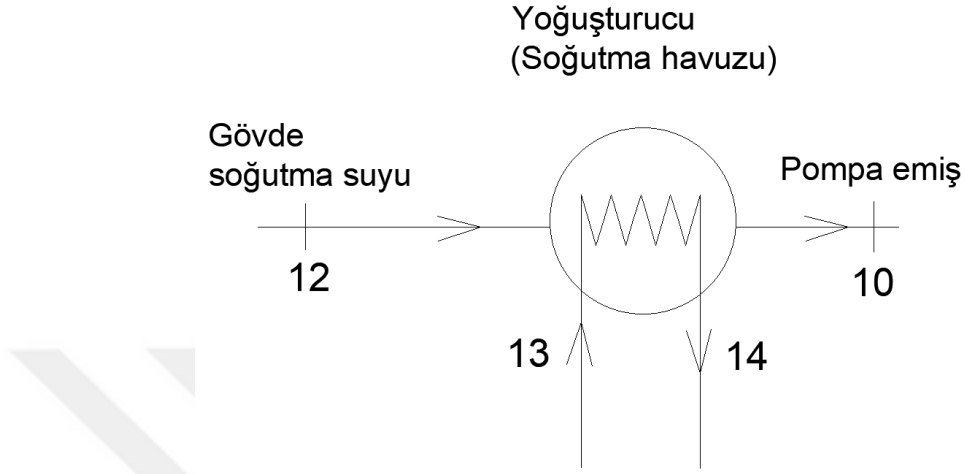
Soğutma suyu pompasına giren suyun kimyasal bileşeni Çizelge 4.11’da verilmiştir.

Çizelge 4.11 Soğutma suyunun kimyasal bileşeni

Soğutma Suyu	Mol Ağırlığı (kg/kmol) M	Kütle Yüzdesi (%) Y	Kütlesel Debi (kg/s) $\dot{m}$
H ₂ O	18	100	158.33
Toplam		100	158.33

Tav fırınından ısınarak çıkan soğutma suyu su ünitesinde hava ile teması sağlanarak ortam sıcaklığında soğutulmaktadır. Soğutma kulelerinin kapasiteleri sistem ihtiyacını ve gerekli soğutma işlemini sağlayacak şekilde tasarlanmıştır.

Soğutma kulesine ait giren ve çıkan akımlar Şekil 4.9’ da gösterilmiştir. Ayrıca soğutma kulesine ait kütle, enerji, entropi ve ekserji dengeleri aşağıdaki eşitliklerde verilmiştir.



Şekil 4.9. Soğutma kulesi (Yoğuşturucu)

$$\text{Kütle} \quad : \dot{m}_{12} + \dot{m}_{13} = \dot{m}_{10} + \dot{m}_{14} \quad (4.21a)$$

$$\text{Enerji} \quad : \dot{m}_{12}h_{12} + \dot{m}_{13}h_{13} = \dot{m}_{10}h_{10} + \dot{m}_{14}h_{14} \quad (4.21b)$$

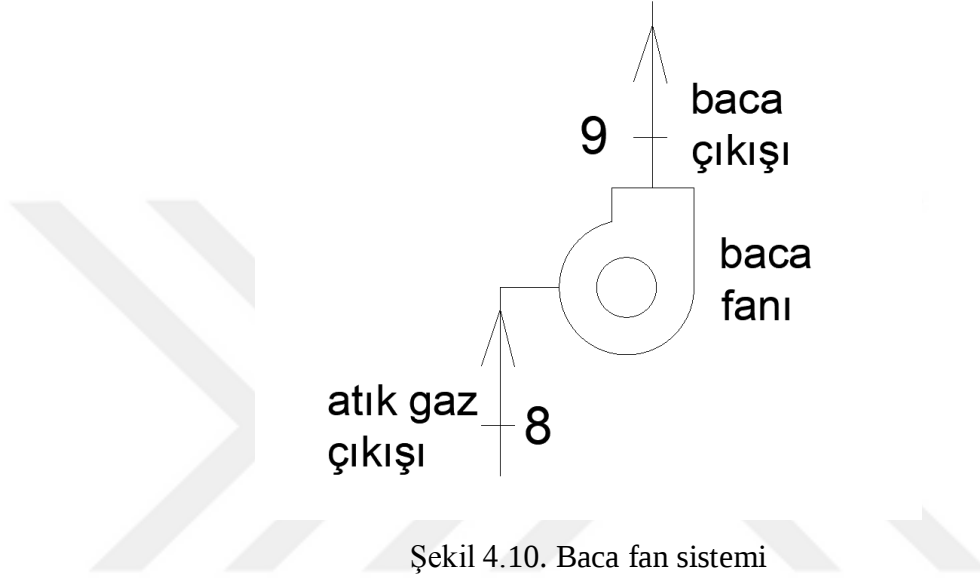
$$\text{Entropi} \quad : \dot{m}_{12}s_{12} + \dot{m}_{13}s_{13} + \dot{S}_{\text{üretim,soğ.kulesi}} = \dot{m}_{10}s_{10} + \dot{m}_{14}s_{14} \quad (4.21c)$$

$$\text{Ekserji} \quad : \dot{m}_{12}ex_{12} + \dot{m}_{13}ex_{13} = \dot{m}_{10}ex_{10} + \dot{m}_{14}ex_{14} + \dot{Ex}_{\text{yıkım,soğ.kulesi}} \quad (4.21d)$$

Tav fırınında meydana gelen yanma sonucu açığa çıkan baca gazı reküperatörden geçtikten sonra baca fanı yardımıyla 18 metre yüksekliğe sahip bacadan atmosfere atılmaktadır. Bacadan atık gazın atılması 250 kW’lık güce sahip bir fan ile gerçekleştirilmektedir. Baca fan sistemine ait teknik özellikler Çizelge 4.12’da gösterilmiştir.

Çizelge 4.12. Bacanın özelliği

Kapasitesi	70.000 Nm ³ /h (20 °C)
Statik Basınç	500 mm. w.c.
Çalışma Sıcaklığı	20 °C
Kurulu Güç	250 kW



Şekil 4.10. Baca fan sistemi

Baca Fan sistemine ait giren ve çıkan akımlar Şekil 4.10' da gösterilmiştir. Ayrıca baca fan sistemine ait kütle, enerji, entropi ve ekserji dengeleri aşağıdaki eşitliklerde verilmiştir.

$$\text{Kütle} \quad : \dot{m}_8 = \dot{m}_9 \quad (4.22a)$$

$$\text{Enerji} \quad : \dot{m}_8 h_8 + W_{baca\ fanı} = \dot{m}_9 h_9 \quad (4.22b)$$

$$\text{Entropi} \quad : \dot{m}_8 s_8 + \dot{S}_{\text{üretim},baca\ fanı} = \dot{m}_9 s_9 \quad (4.22c)$$

$$\text{Ekserji} \quad : \dot{m}_8 ex_8 + W_{baca\ fanı} = \dot{m}_9 ex_9 + \dot{E}_{\text{yıkım},baca\ fanı} \quad (4.22d)$$

4.2. Tav Fırını Yüzeyi Isı Transferi Denklemleri

Tav fırın yüzeylerinde meydana gelen ısı transfer kayıplarının hesaplanması için, yüzeylerde iletim yoluyla transfer edilen ısı miktarının taşınım ile atmosfere verilen ısı miktarına eşit olduğu kabulüne dayanarak, ısı transferinin hesaplanmasında lineer ısı iletim denklemlerinden yararlanılmıştır. Fourier ısı iletim kanunu ile lineer ısı iletimi (Çengel ve Boles, 2011);

$$Q = -kA \frac{dT}{dL} \quad (4.23)$$

şeklinde tanımlanmıştır. Burada k , A ve L ifadeleri sırasıyla ısı iletim katsayısı, ısı transfer yüzey alanı ve duvar kalınlığını ifade etmektedir. Isı transfer hesaplamalarında kullanılan eş değer ısı direncinin genel eşitliği (Halıcı ve Gündüz, 2010);

$$R_{eş} = \frac{L}{kA} \quad (4.24)$$

olarak yazılmaktadır. Fourier ısı iletim kanunu bu eşitliğe göre yeniden düzenlendiğinde (Halıcı ve Gündüz, 2010);

$$Q = \frac{kA}{L} (T_i - T_d) \leftrightarrow Q = \frac{1}{\left(\frac{L}{kA}\right)} \times (T_i - T_d) \leftrightarrow Q = \frac{1}{R_{eş}} \times (T_i - T_d) \leftrightarrow Q = \frac{(T_i - T_d)}{R_{eş}} \quad (4.25)$$

eşitliği elde edilmektedir. Burada T_i iç yüzey sıcaklığını, T_d dış yüzey sıcaklığını ve $R_{eş}$ eşdeğer direnci ifade etmekte olup sistemin bütünü için (Dossat ve Horan, 2001);

$$R_{eş} = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + \dots \quad (4.26)$$

eşitliği kullanılarak eş değer direnç hesaplanmaktadır. Açılır kapakların, açık kalma ve kapalı kalma süreleri boyunca toplamda kaybettiği ısı miktarı;

$$Q_{ak} = \frac{(Q_{kyk} \times t_k)}{(t_a + t_k)} \quad (4.27)$$

eşitliği ile hesaplanmaktadır. Bu eşitlikte Q_{ak} , Q_{kyk} , t_a , t_k ifadeleri sırasıyla açılır kapaklardaki ısı kaybı, kapağın tamamen kapalı iken kapak yüzey kaybı, açık kalma süresi ve kapalı kalma süresini ifade etmektedir.

4.2.1. Tav Fırınındaki Enfiltrasyon Kayıpları

Tav fırını üzerinde bulunan ve belirli zaman aralıklarında açılan kapaklardan ortama verilen hava ve sızıntı havalar ile kaybolan ısı miktarı infiltrasyonu ifade etmektedir. Enfiltrasyon ile gerçekleşen ısı kaybı (Dossat ve Horan, 2001);

$$Q_{enf} = \dot{m}(h_{iç} - h_{dış}) \quad (4.28)$$

eşitliği ile hesaplanmaktadır. Burada $\dot{m}$ ve h ifadeleri sırası ile havanın kütledebisini ve entalpisini ifade etmektedir. Dış ve iç alt indisleri ise sırası ile tav fırının dış ortamını ve tav fırının iç ortamını ifade etmektedir.

4.3. Eksergoekonomik Analiz

Isıl sistemlerin geliştirilmesi ve verimli işletilmesi amacıyla rasyonel kararların alınabilmesi için termodinamik, akışkanlar mekaniği, ısı transferi ve benzeri ısı bilimlerden elde edilen sonuçların mühendislik ekonomisi ile birleştirilmesi termoekonomi olarak adlandırılır (Yüncü, 2010).

Entegre sistemlerin optimizasyonunda ve sürdürülebilirliğinde ekserji analizini ve ekonomik analizi bir arada kullanmak sistem geleceği ve güvenliği açısından faydalı olmaktadır. Eksergo-ekonomik analiz, ekserji temelli termodinamik analizi ekonomik verilerle destekleme prensibine dayanmaktadır (Dincer ve Rosen, 2013). Ekserji analizinde entegre sistemin tüm proseslerinin her bir durumu için ekserji dengeleri ve kayıpları hesaplanırken, eksergo-ekonomik analizde ise; sermaye maliyeti, işletme ve bakım maliyetleri de hesaplanmaktadır.

Eksergo-ekonomik değerlendirme, sistemin herhangi bir bileşeni için sınırdan ısı ve iş geçişleri de dikkate alınarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\sum \dot{C}_g + \dot{C}_g^W + \dot{C}_g^Q + \dot{Z}_k = \sum \dot{C}_\zeta + \dot{C}_\zeta^W + \dot{C}_\zeta^Q \quad (4.29)$$

Burada $\sum \dot{C}_g$ ve $\sum \dot{C}_\zeta$ sırasıyla sistem sınırlarına giren ve çıkan ekserji akışlarına ilişkin toplam maliyettir ve genel olarak aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\dot{C}_g = c_g \dot{E}x_g = c_g (\dot{m}_g ex_g) \quad (4.30)$$

ve

$$\dot{C}_\zeta = c_\zeta \dot{E}x_\zeta = c_\zeta (\dot{m}_\zeta ex_\zeta) \quad (4.31)$$

burada c_g ve c_ζ sırasıyla sistem sınırlarına giren ve çıkan ekserji başına maliyettir ve birimi \$/kWh'dir. Isı ve iş geçişiyle ilgili maliyet aşağıda verilmiştir.

$$\dot{C}^W = c_W \dot{E}x^W \quad (4.32)$$

$$\dot{C}^Q = c_Q \dot{E}x^Q = c_Q \dot{Q} \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \quad (4.33)$$

Denklem (4.34)'de verilen $\dot{Z}_k$ ise yatırım, bakım ve işletme maliyetini ifade etmektedir. Herbir sistem bileşeni için maliyet birim zaman için aşağıda verildiği gibi hesaplanabilir.

$$\dot{Z} = \frac{Z_i AGKF \phi}{3600N} \quad (4.34)$$

burada Z_i ile ifade edilen sistem bileşenin satın alma maliyeti, ϕ bakım faktörüdür ve genellikle 1,06 olarak kullanılmaktadır (Bejan vd., 1995). N ise yıl içinde işletme saatidir.

Anapara geri kazanım faktörü (AGKF) ise, i faiz oranı, n yıl boyunca başlangıç sermayesini, işletme ve bakım maliyetlerini amortisman etmek için kullanılmıştır (Bejan vd., 1995).

$$AGKF = \frac{i(i+1)^n}{(1+i)^{n-1}} \quad (4.35)$$

4.3.1. Endüstriyel tav fırınının eksergoekonomik analizi

Şekil 4.5' de verilen yanma havası fan sistemi'nin termoeekonomik denge denklemi aşağıda verilmiştir.

$$\dot{C}_1 + \dot{C}_{YHF}^W + \dot{Z}_{YHF} = \dot{C}_2 \quad (4.36)$$

veya

$$c_1(\dot{m}_1 ex_1) + c_{pompa} \dot{E}x_{pompa}^W + \dot{Z}_{pompa} = c_2(\dot{m}_2 ex_2) \quad (4.37)$$

yazılabilir.

Sistemde kullanılan pompanın maliyeti pompanın gücü ve veriminden yararlanılarak hesaplanmaktadır (Misra vd., 2006):

$$\dot{Z}_{YHF}(\$) = 705,48(\dot{W}_{YHF})^{0,71} \left[1 + \left(\frac{0,2}{1-\eta_{YHF}} \right) \right] \quad (4.38)$$

Şekil 4.6' da verilen reküperatör'ün termoeekonomik denge denklemi aşağıda verilmiştir.

$$\dot{C}_2 + \dot{C}_7 + \dot{Z}_{RKP} = \dot{C}_3 + \dot{C}_8 \quad (4.39)$$

veya

$$c_2(\dot{m}_2 ex_2) + c_7(\dot{m}_7 ex_7) + \dot{Z}_{RKP} = c_3(\dot{m}_3 ex_3) + c_8(\dot{m}_8 ex_8) \quad (4.40)$$

yazılabilir.

Reküperatör'ün satın alma maliyeti şu şekildedir (Misra vd., 2006):

$$\dot{Z}_{RKP}(\$) = 130 \left(\frac{A_{RKP}}{0,093} \right)^{0.83} \quad (4.41)$$

burada A_{RKP} şöyle ifade edilmektedir:

$$A_{RKP} = \frac{\dot{Q}_{RKP}}{U_{RKP} \left\{ \frac{(T_2 - T_8) - (T_3 - T_7)}{\ln \left(\frac{(T_2 - T_8)}{(T_3 - T_7)} \right)} \right\}} \quad (4.42)$$

burada U_{RKP} reküperatör'ün toplam ısı transfer oranı katsayısıdır.

Şekil 4.8' de verilen soğutma suyu pompası'nın termoeconomik denge denklemi aşağıda verilmiştir.

$$\dot{C}_{10} + \dot{C}_{SSP}^W + \dot{Z}_{SSP} = \dot{C}_{11} \quad (4.43)$$

veya

$$c_{10}(\dot{m}_{10} ex_{10}) + c_{SSP} \dot{E}x_{SSP}^W + \dot{Z}_{SSP} = c_{11}(\dot{m}_{11} ex_{11}) \quad (4.44)$$

yazılabilir.

Sistemde kullanılan pompanın maliyeti pompanın gücü ve veriminden yararlanılarak hesaplanmaktadır (Misra vd., 2006):

$$\dot{Z}_{SSP}(\$) = 705,48 (\dot{W}_{SSP})^{0,71} \left[1 + \left(\frac{0,2}{1 - \eta_{SSP}} \right) \right] \quad (4.45)$$

Şekil 4.9' de verilen yoğuştuur' cunun termoeconomik denge denklemi aşağıda verilmiştir.

$$\dot{C}_{12} + \dot{C}_{13} + \dot{Z}_{YGS} = \dot{C}_{10} + \dot{C}_{14} \quad (4.46)$$

veya

$$c_{12}(\dot{m}_{12}ex_{12}) + c_{13}(\dot{m}_{13}ex_{13}) + \dot{Z}_{YGS} = c_{10}(\dot{m}_{10}ex_{10}) + c_{14}(\dot{m}_{14}ex_{14}) \quad (4.47)$$

yazılabilir.

Yoğuştu'cunun satın alma maliyeti şu şekildedir (Misra vd., 2006):

$$\dot{Z}_{YGS}(\$) = 130 \left(\frac{A_{YGS}}{0,093} \right)^{0.83} \quad (4.48)$$

burada A_{YGS} şöyle ifade edilmektedir:

$$A_{YGS} = \frac{\dot{Q}_{YGS}}{U_{YGS} \left\{ \frac{(T_{13}-T_{10})-(T_{12}-T_{14})}{\ln\left(\frac{T_{13}-T_{10}}{T_{12}-T_{14}}\right)} \right\}} \quad (4.49)$$

burada U_{YGS} yoğuşturucu' nun toplam ısı transfer oranı katsayısıdır.

Şekil 4.10' da verilen baca fan'ının termoekonomik denge denklemi aşağıda verilmiştir.

$$\dot{C}_8 + \dot{C}_{BF}^W + \dot{Z}_{BF} = \dot{C}_9 \quad (4.50)$$

veya

$$c_8(\dot{m}_8ex_8) + c_{BF}E\dot{x}_{BF}^W + \dot{Z}_{BF} = c_9(\dot{m}_9ex_9) \quad (4.51)$$

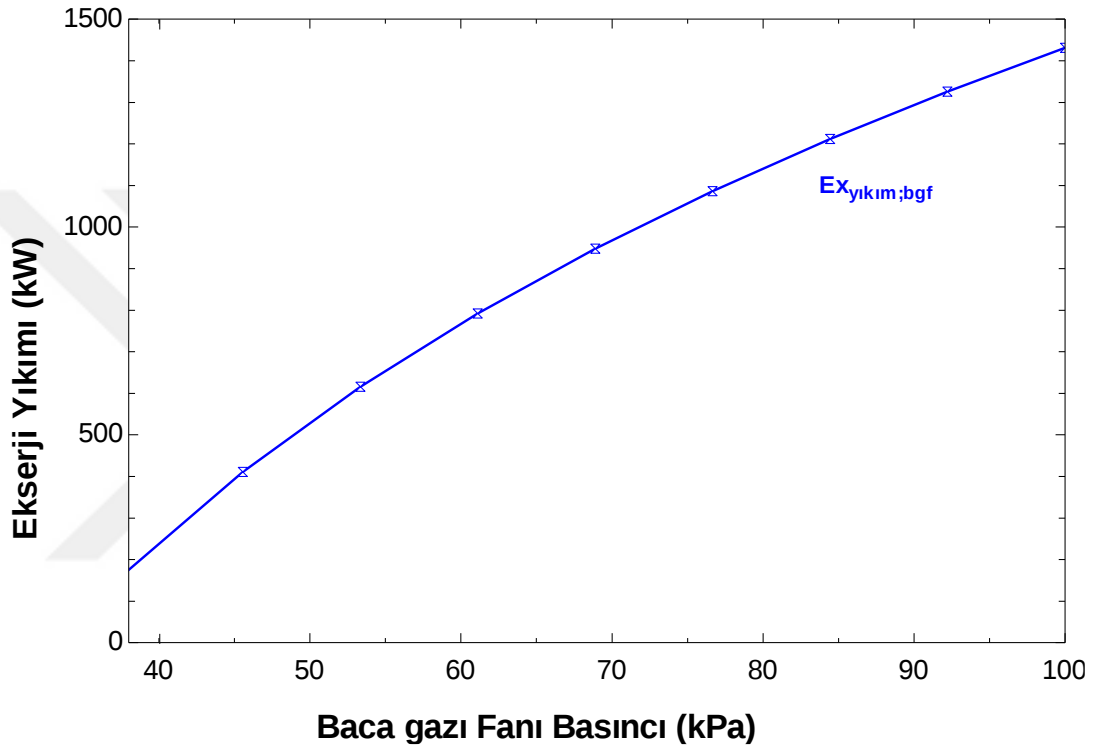
yazılabilir.

Sistemde kullanılan pompanın maliyeti pompanın gücü ve veriminden yararlanılarak hesaplanmaktadır (Misra vd., 2006):

$$\dot{Z}_{BF}(\$) = 705,48(\dot{W}_{BF})^{0,71} \left[1 + \left(\frac{0,2}{1-\eta_{BF}} \right) \right] \quad (4.52)$$

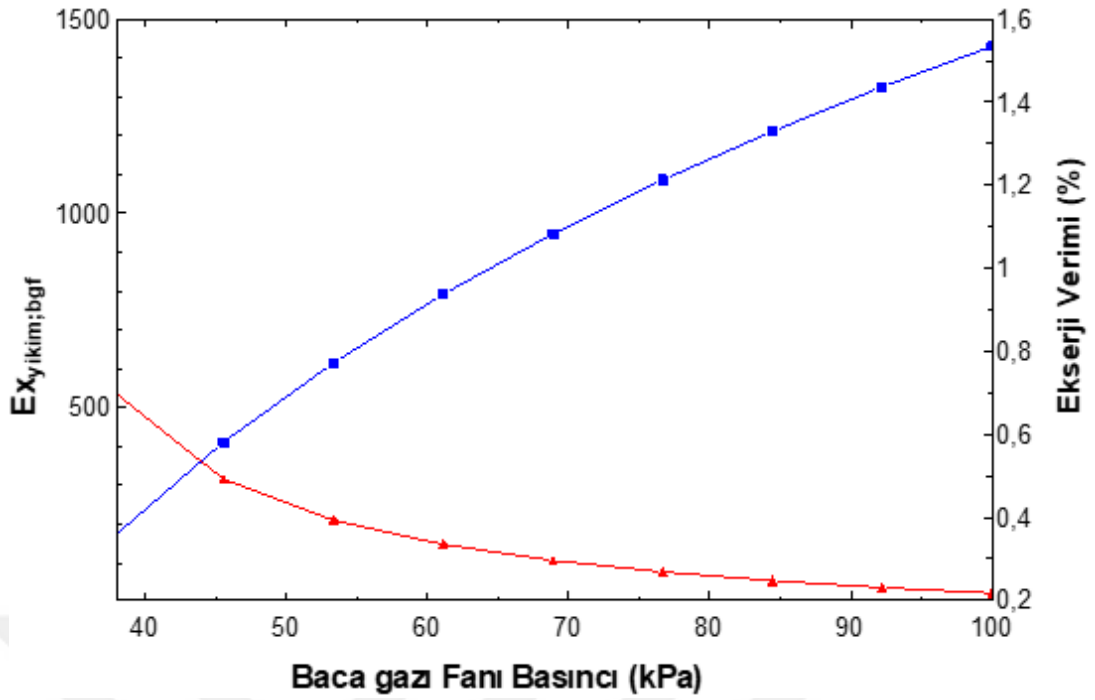
5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Baca gazı fanında gerçekleşen ekserjinin yıkımı Şekil 5.1.' deki diyagramda gösterilmiştir. Baca gazı fanın giriş basıncının arttırılmasıyla baca gazındaki ekserjinin arttığı şekilde görülmektedir. Şekilden de anlaşılacağı üzere vakum basınçlarında ekserji yıkımının minimuma yaklaştığı görülmektedir. İncelenen tav fırını sisteminde incelenen baca fanı 40 kpa basıncıta çalışmaktadır.



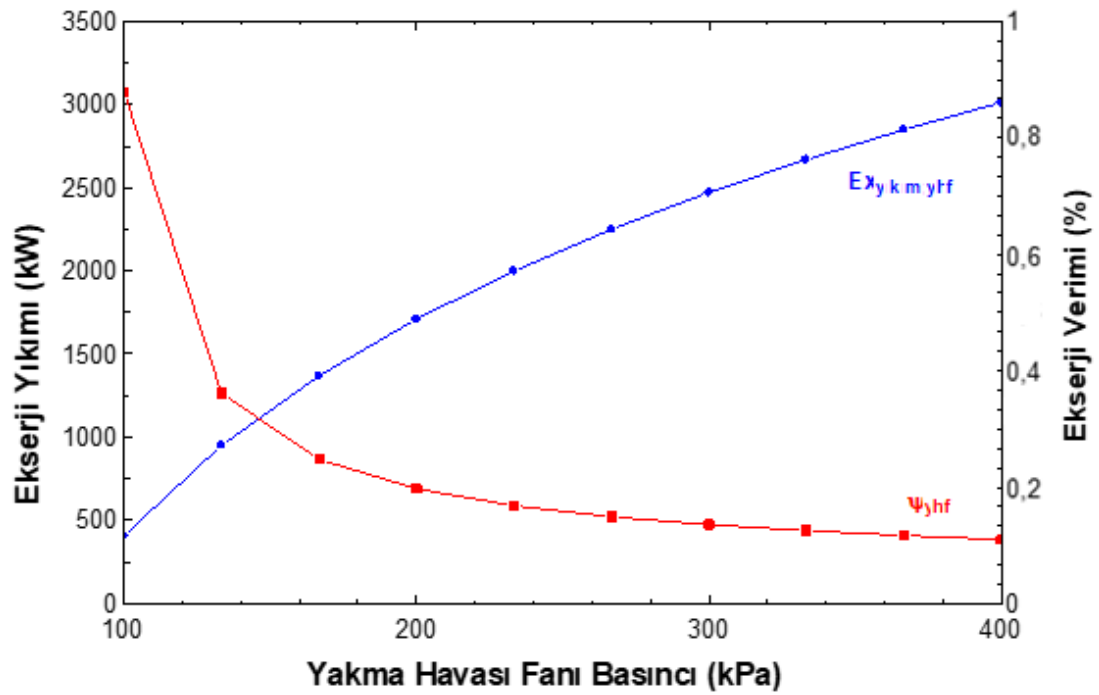
Şekil 5.1. Baca gazı fanı giriş basıncına bağlı ekserji yıkım diyagramı

Baca gazı fanında meydana gelen ekserjinin yıkımına ait verim diyagramı Şekil 5.2.' de verilmiştir. Baca gazı basıncının artması ile birlikte baca gazındaki ekserji yıkım veriminin düştüğü görülmektedir.



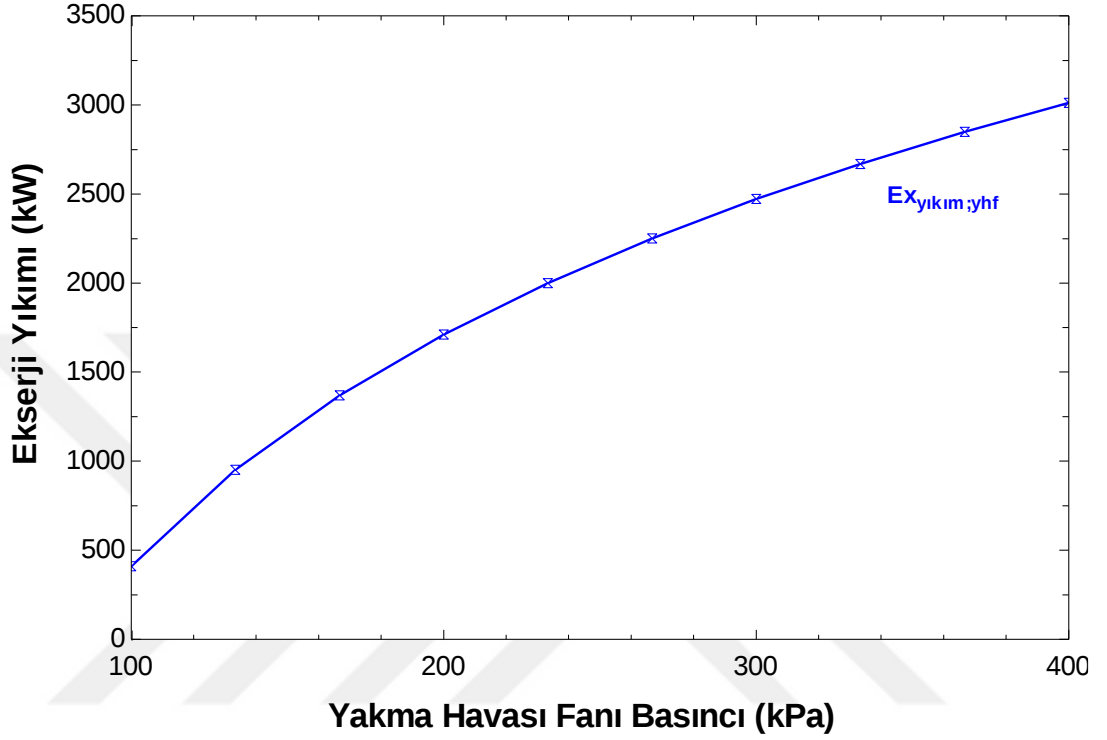
Şekil 5.2. Baca gazı fan basıncı ekserji yıkımı

Yanma havası fanında gerçekleşen ekserjinin yıkımı Şekil 5.3.' deki diyagramda gösterilmiştir. Yanma havası fan basıncında meydana gelen artışa paralel olarak yanma havası fanı ekserji yıkımında arttığı görülmektedir. Dolayısıyla yine fan basıncındaki bu artış ekserji veriminde azalmasına sebep olmaktadır.



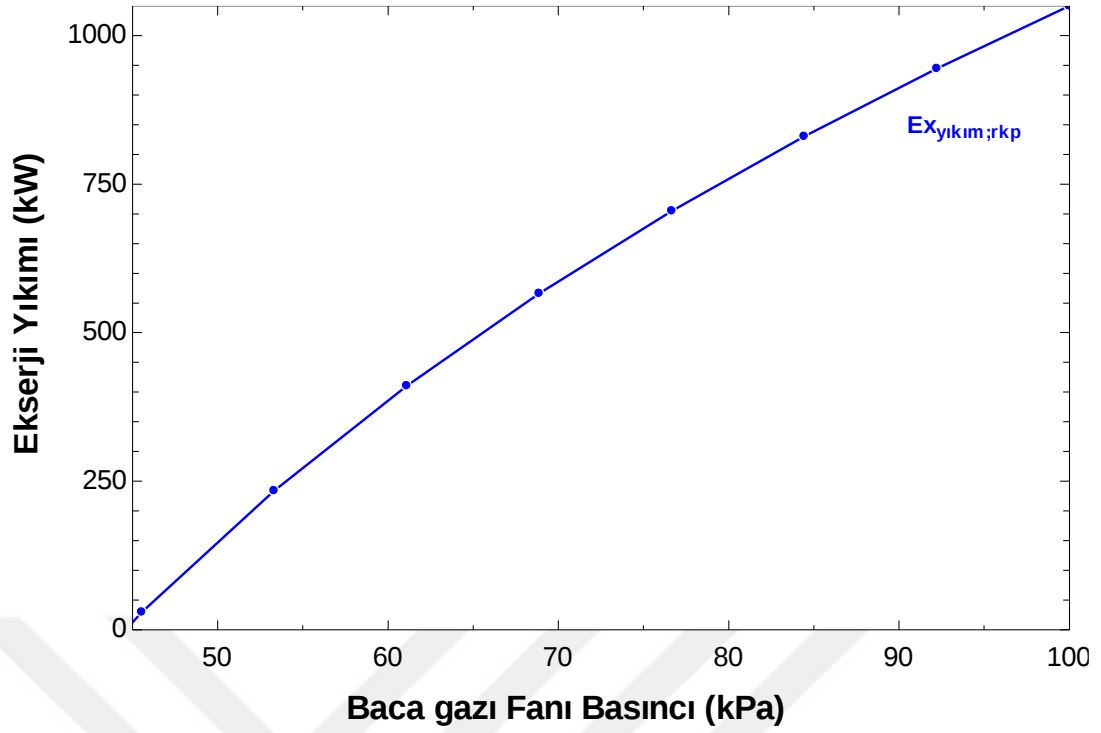
Şekil 5.3. Yakma havası fan basıncı ekserji yıkımı

Yanma havası fan basıncının değişimine ait yakma havası fanında meydana gelen ekserji yıkımını gösteren diyagram Şekil 5.4.' de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi fan basıncının arttırılmasının yakma havası fanındaki ekserji yıkımının arttığını göstermektedir.



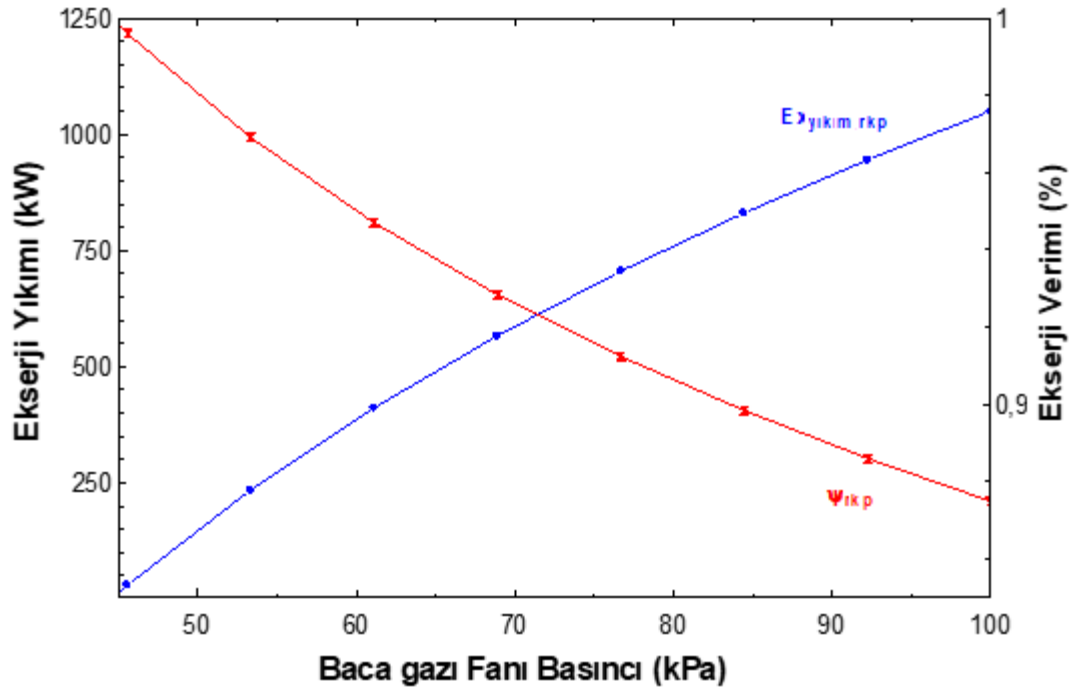
Şekil 5.4. Yakma havası fanı basınç değişimi diyagramı

Baca gazı fanının basıncının arttırılması, reküperatör ile sağlanan tav fırınına beslenen yakma havasının sıcaklığının değişimine göre meydana gelen reküperatördeki ekserji yıkımını gösteren Şekil 5.5.' deki diyagramda verilmiştir. Fan basıncının arttırılması reküperatörden geçen tav fırını yakma havasına aktarılacak olan ısı enerjisini eklediğinden ekserji yıkımı fan basıncının artmasıyla doğru orantı olarak artmaktadır.



Şekil 5.5. Reküperatör ekserji yıkımı

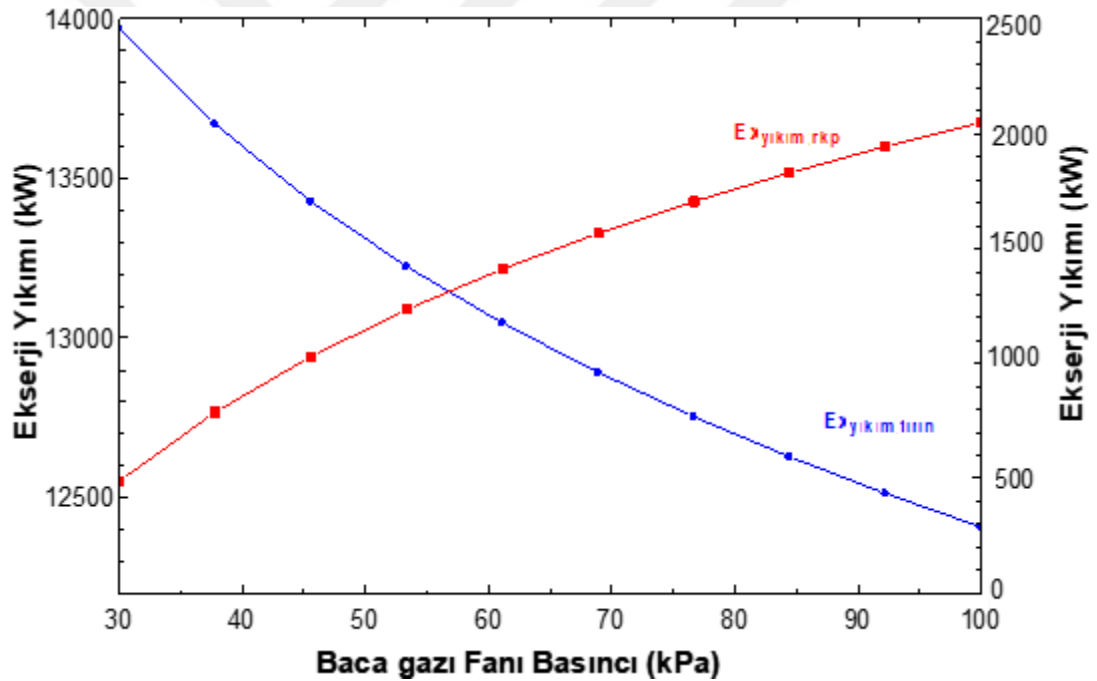
Baca gazı fanı basıncının değişiminin, tav fırını yakma havasını etkileyeceğinden bu etkileşimi reküperatörün sağlamasından dolayı reküperatöre ait ekserji veriminin ve ekserji yıkımının baca gazı fanı basıncına bağlı değişimi Şekil 5.6.' da verilmiştir.



Şekil 5.6. Reküperatör ekserji verim diyagramı

Şekil 5.6.' da görüldüğü gibi baca gazı fan basıncının arttırılması reküperatörün ekserji yıkımını arttırmakta dolayısıyla reküperatörün ekserji veriminide azaltmaktadır. Bu verim kaybı ve ekserji yıkımını azaltmak için mümkün olduğu kadar düşük basınçlarda çalışmak sistemin etkinliği açısından önem kazanmaktadır. Yukarıda da belirttiğimiz gibi sistemde bulunan baca gazı fanı mümkün olduğunca inilabilen değerlerde çalıştırılarak düşük ekserji yıkımı yüksek enerji verimi alınmaktadır. Baca gazı fanının basıncının genel ortalaması 40 kPa civarındadır.

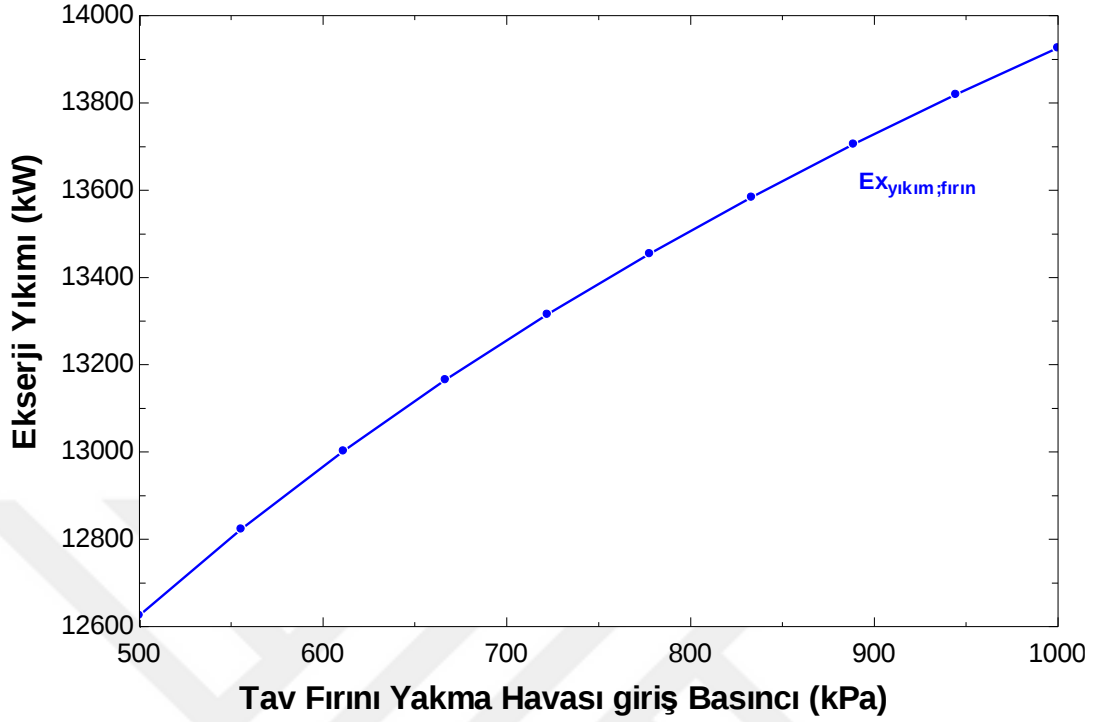
Sistemin ideal yanma şartlarında çalışmasını sağlayan baca gazı fanının basıncının değişiminin, tav fırının ekserji yıkımına ve yakma havasının ön ısıtılmasını sağlayan reküperatörün ekserji yıkımına etkisini gösteren diyagram Şekil 5.7.' de verilmiştir.



Şekil 5.7. Tav fırını ekserji yıkımı diyagramı

Baca gazı fan basıncının artması tav fırınındaki ekserji yıkımını azalttığı ve yakma havasının ön ısıtılmasını sağlayan reküperatörün ekserji yıkımını arttırdığı Şekil 5.7.' de görülmektedir. Sisteme ait baca gazı fanı 40 kPa basınç civarında çalıştığından dolayı burada tav fırınına ait ekserji yıkımında minimum değere kadar yaklaşılmıştır.

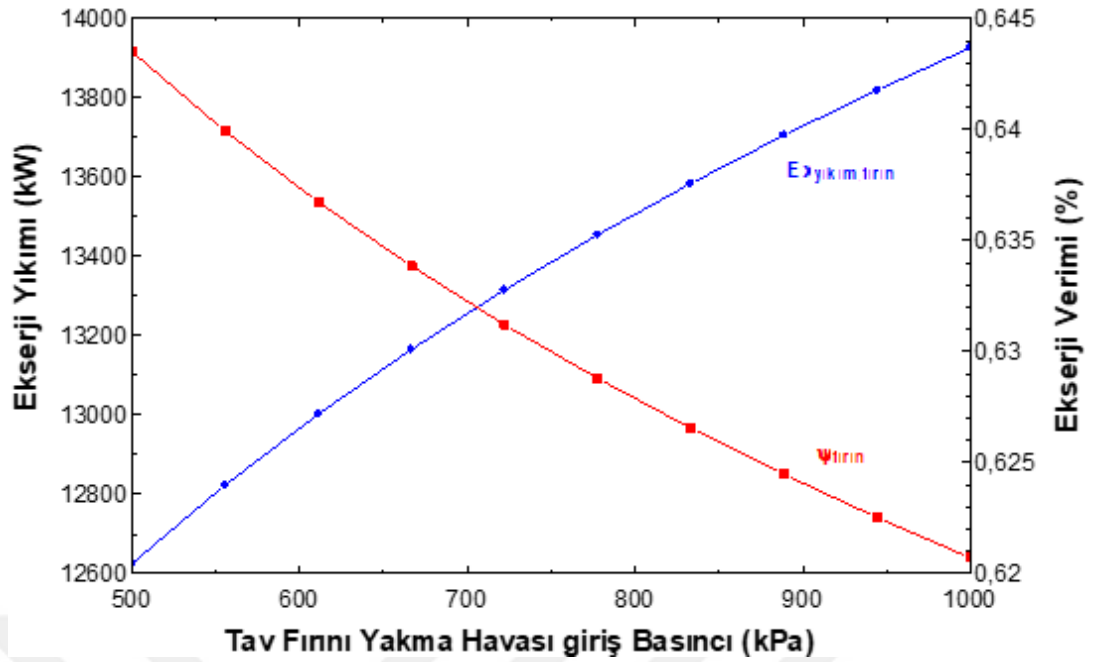
Rekuperatörden sağlanan ön ısıtma ile tav fırınına giren yakma havasının basıncının tav fırınının ekserji yıkımına etkisine gösteren diyagram Şekil 5.8.' de verilmiştir.



Şekil 5.8. Tav fırınındaki yakma havası ekserji diyagramı

Şekil 5.8.' de görüldüğü gibi rekuperatörde ön ısıtma ile enerjisi artırılan tav fırını yakma havasının basıncının arttırılması, tav fırınının ekserji yıkımını da arttırdığı ifade edilmektedir.

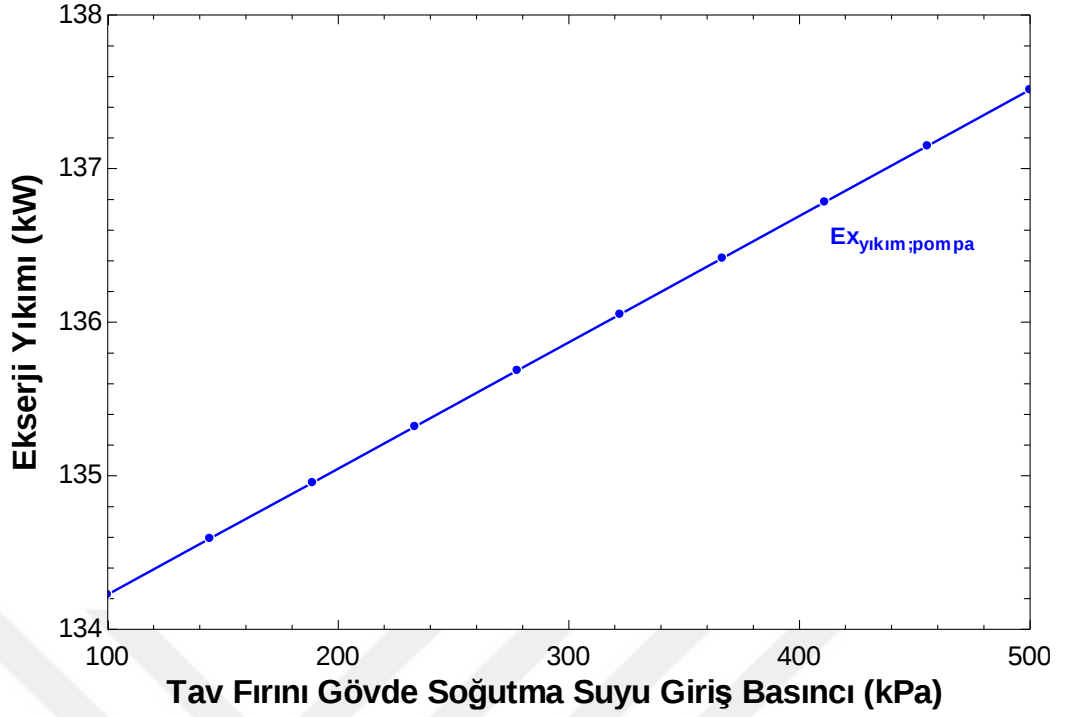
Dış ortamdan yakma havası fanı ile çekilen yaklaşık 20 °C deki yanma havasının ön ısıtılması için rekuperatörden geçirildiği daha önce ifade edilmişti. Bu dış ortamdaki hava rekuperatörde ortamala 295 °C sıcaklıklara ulaştırılmaktadır. Bu ısıtılmış yakma havası daha verimli bir tav fırını meydana getirmek için kütüğün tavlmasına yardımcı olmaktadır. Doğalgaz ile yakma havasının beslendiği tav fırınına ait ekserji yıkımı ve ekserji verimini gösteren diyagram Şekil 5.9.' da verilmiştir.



Şekil 5.9. Tav fırını yakma havası ekserji verim diyagramı

Şekil 5.9.' da görüldüğü gibi kütüğün tavlama sırasında yardımcı eleman olan yakma havasının basıncının arttırılması tav fırınının ekserji yıkımının artmasına, ekserji veriminin azalmasına sebep olmaktadır.

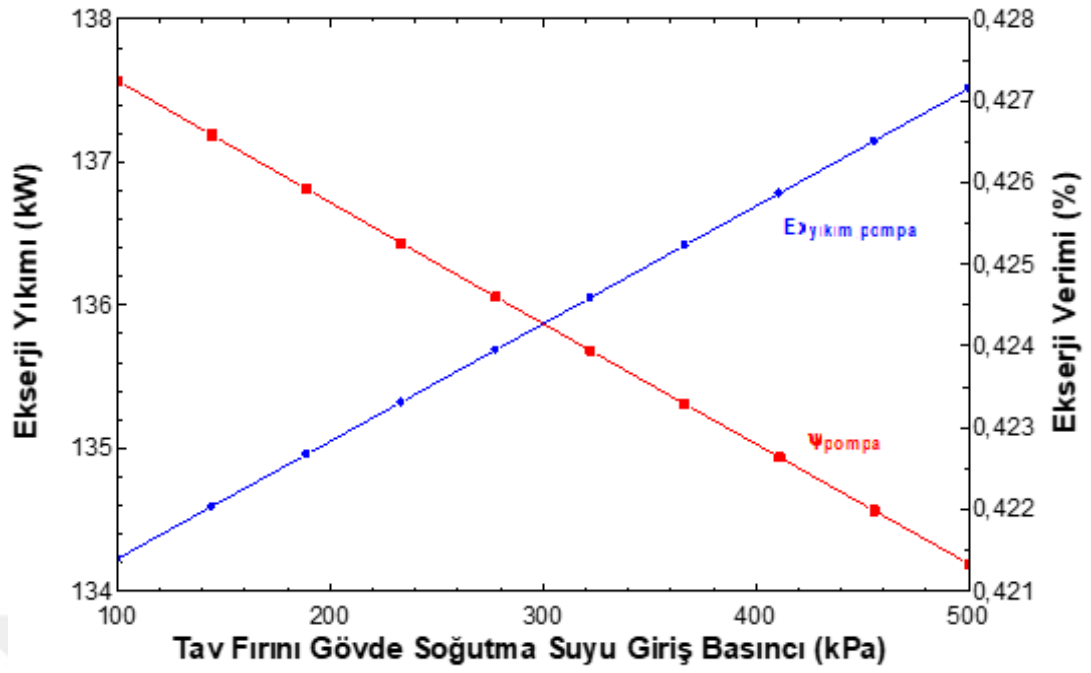
Tav fırınında yaklaşık 1050 °C' ye kadar tavlama kütük fırını terk ettiği anda bu tavlama sağlayan doğalgaz ile sağlanan yüksek ısı enerjisi tav fırınının gövde yüzeyinin ısınmasına dolayısıyla bu yüzeydeki malzemelerin ısı deformasyonuna uğramasına sebep olmaktadır. Bu ısı deformasyonu önlemek için fırına ait sabit ve hareketli tabanların soğutulması, ayrıca fırın içi rölelerin ve diğer ekipmanların soğutulmasında gövde soğutma suyu ile tabir edilen 570 m³/h 'lık debideki suyun giriş basıncının değişimine bağlı olarak bu suyu besleyen besleme pompasının ekserji yıkımı Şekil 5.10.'da verilmiştir.



Şekil 5.10. Tav fırını gövde soğutma suyu basınç değişimine bağlı ekserji yıkımı

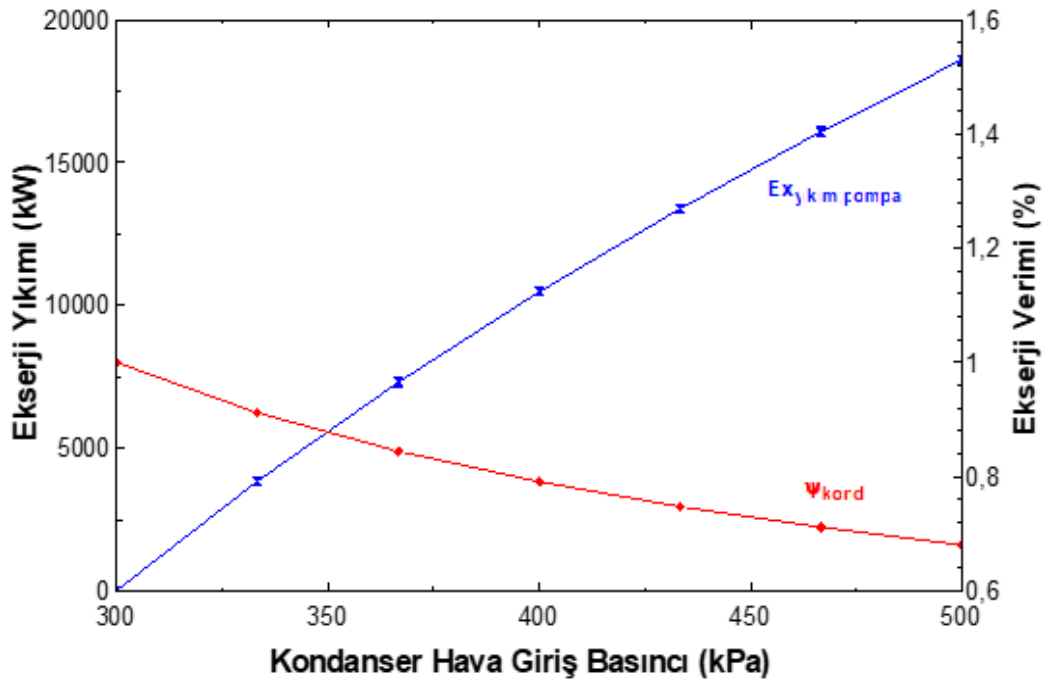
Şekil 5.10.' da görüleceği gibi taşıyıcı ekipmanlarda ve rolelerde oluşan ısıl deformasyonların önlenmesini hedefleyen gövde soğutma suyunun giriş basıncının arttırılması bu basıncı sağlayan besleme suyu pompasının ekserji yıkımının artmasına sebep olmaktadır.

Tav fırınına fırın içi giriş röleleri ile giren kütüğün fırın çıkışına kadar aktarılmasını sağlayan yürüyen kirişler, bu taşıma esnasında yanma odası görevi gören tav fırınının ortam sıcaklığından aldığı ısı ve tavlanan kütüğün temas yüzeyinden iletim ile rolelere aktarılan ısının bu rolelere ısıl deformasyonun en aza indirilmesi sağlayan, rolelerin bir yüzlerinden girip role içerisinden dolaşarak dolaşmaktadır. Soğutma suyunun giriş basıncının arttırılması bu basıncı sağlayan pompanın ekserji yıkımının artmasına doğal olarak ekserji veriminin azalmasına sebep olduğu Şekil 5.11.' de görülmektedir.



Şekil 5.11. Tav fırını soğutma suyu pompası ekserji verim diyagramı

Fırın içi sabit ve hareketli ekipmanların soğutulmasında kullanılan soğutma suyu giriş-çıkış sıcaklık farkı fırın tasarım verilerine göre 15 °C olmalıdır. Bu suyun bu sıcaklık derecelerinde kalmasını sağlayan soğutma kuleleri hava soğutmalı olarak tasarlanmıştır. Bu soğutma kulelerindeki hava fanlarının kule su döküş oluğuna basma basıncının değişimini ve bu değişime bağlı olarak soğutma kulesinin ekserji yıkımını ve soğutma kulesinin ekserji verimini gösteren grafik Şekil 5.12.' de gösterilmektedir.



Şekil 5.12. Kondanserdeki havanın ekserji verim diyagramı

Soğutma kulesi hava giriş basıncı yaklaşık 300 kPa basıncında çalışmaktadır. Bu hava basıncının arttırılması sistemde daha fazla soğutmaya sebep olurken kondenserdeki ekserji yıkımının artmasına ve dolayısıyla kondenserin ekserji verimin azalmasına sebep olmaktadır.



6. SONUÇ

Bu çalışmada saatte 95 adet kütük tavlama kapasitesine sahip bir tav fırınına ait enerji ve ekserji analizleri EES (Engineering Equation Solver) programı yardımıyla gerçek fabrika verileri kullanılarak yapılmıştır.

Yapılan çalışmada, tav fırınının yanma havasının ortamdan uzaklaştırılarak temiz yakma havasının içeriye girmesini sağlayan baca gazı fanının ekserji yıkımı ve ekserji verimi incelenmiş 40 kPa emiş basıncında minimum ekserji yıkımı ve maksimum ekserji veriminin alındığı görülmüştür. Ayrıca yapılan çalışmada yakma havası giriş basıncının arttırılmasının reküperatör olarak ifade edilen genel anlamda ıstavroz yapıda ısı değiştirici olarak adlandırılan ekipmanın ekserji yıkımında artışa sebep olması sistem verimine etki sağlarken diğer tarafta ekipmanın ısıl deformasyona sebep olmasından dolayı optimum aralıkta tutulmasını çözümlenen grafiklerde gösterilmek üzere araştırma bulgular bölümünde verilmiştir.

En yüksek ekserji yıkımının olduğu ekipman tav fırınıdır. Tav fırının genişliği 12, 80 metre ve uzunluğu 24 metredir. Fırın içerisine giren kütük maksimum 180 mm'lik bir referansa sahip olmalıdır. Endüstriyel tav fırını 95 adet kütük alma kapasitesine sahiptir. Tav fırınındaki ekserji yıkımının bu denli yüksek olmasının sebebi yanma odası görevi görmesi ve yüksek ısıl kapasite ve debiye sahip metan gazının (CH₄) yanmasından kaynaklanmaktadır. Tav fırınına alt ısı değeri 45000 kJ/kg, debisi 3100 m³/h olan doğalgaz ile çalıştırılması bu ekserji yıkımına sebep olan en büyük etkenlerden biridir. Bu değeri düşürmek alternatif ve daha ucuz yakıtlarla mümkün olmasına rağmen kütüğün fırın içerisinde tavlama süresinin artmasına ve merkezci bir tavlama olmamasına sebebiyet vereceğinden dolayı çok tercih edilecek bir durum gözükmemiştir. Fosil yakıtlar denense bile yakıtta bulunan Karbon (C) miktarı artacağından dolayı baca gazı çıkışına torbalı filtre ya da elektrofiltre ile tabir edilen endüstriyel toz tutucuların kullanılması gerekecektir. Bu da sistem kurulum ve işletme maliyetlerini arttıracığından dolayı çok tercih edilen bir durum olmayacaktır. Bu ısıl enerjinin baca dan yüksek sıcaklıklarda terk ettiği görülmektedir yaklaşık 200 oC olan baca gazı çıkış sıcaklığının bir gazdan sıvıya ısı eşanjöründen geçirmek suretiyle buhar elde edilmesi buharın kapasitesi ve reküperatördeki yakma havası çıkış sıcaklığının bir miktar düşürülerek baca gazı sıcaklığının güç üretimine imkan veren 240 ila 250 oC

ye çıkarılmasıyla ve bu buharın bir rankine çevrimi uygulamasıyla yaklaşık 3 MW güç üretebileceği görülmektedir. Yine bu baca gazından atılan atık ısının fabrika içindeki ünitelerin ısıtma ihtiyacında ve personel sosyal tesislerinde kullanılan sıcak su ihtiyacının karşılanmasında gazdan sıvıya bir ısı eşanjörü kullanılarak sağlanabileceği belirtilmiştir.



KAYNAKLAR

- AB, (2001). Demir Haddeleme Prosesinde Mevcut En İyi Teknikler Referans Dokümanı Aralık 2001, Tercüme Demir Çelik Üreticileri Derneği Ankara – Mayıs 2007
- Arı, V. (2007). Türkiye Enerji Kaynakları, Enerji Planlaması Ve Enerji Stratejileri
- Bayrak, M. ve Esen, Ö. (2014). Türkiye'nin enerji ihtiyacı açığı ve çözümüne yönelik arayışlar. Atatürk Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi, 28 (3): 139-158.
- Bejan, A., Tsatsaronis, G., Moran, M., (1995). Thermal design and optimization. Wiley-Interscience.
- Bektaş, G. (2009). Toz Deterjan Üretim Tesisinde Enerji ve Ekserji Analizi
- Çağlayan, H. (2015). Seramik sektöründe ısı geri kazanımlı bir püskürtmeli kurutucunun enerji ve ekserji analizi Energy and exergy analyses of a waste heat recovery spray dryer at ceramic sector
- Çengel YA, Boles MA. Mühendislik yaklaşımıyla termodinamik. Derbentli T, Çeviri Editörü. İstanbul: Literatür; 1996, p. 369-791.
- Çengel ve Boles, (2011). Termodinamik, Mühendislik Yaklaşımıyla, 5. Baskı, Çeviri Editörü: Pınarbaşı, A., Güven Bilimsel, İzmir, 753-757, 764.
- Çevir, (2014). Energetic and exergetic analysis of an autoclaved aerated concrete plant / Bir gazbeton fabrikasının enerji ve ekserji analizi
- Chen, W. H., Chung, Y. C. and Liu, J. L. (2005). Analysis on energy consumption and performance of reheating furnaces in a hot strip mill. International Communications in Heat and Mass Transfer, 32(1): 695-706.
- Çomaklı, K., Terhan, M. (2015). “Doğalgaz Yakıtlı Kazandan Çıkan Atık Baca Gazının Ekserji Analizi,” Mühendis ve Makina, cilt 56, sayı 670, s. 58-64.
- Dincer, I., Rosen, M. A. (2013). Exergy: Energy, Environment and Sustainable Development, Second edition . Waltham, USA: Elsevier.
- Dossat ve Horan, (2001). Principles of Refrigeration, 5th edition. Prentice Hall, 0130272701,464, England.
- Ertem, G., Çelik, B. ve Yeşilyurt, S. (2008). Endüstriyel tav fırınlarında ısı dengliği hesaplamaları ve enerji verimliliğinin belirlenmesi. IV. Ege Enerji Sempozyumu, İzmir, 1-8.
- Eyidogan, M., Kaya, D., Dursun Ş. ve Taylan, O. (2014). Endüstriyel tav fırınlarında enerji tasarrufu ve emisyon azaltım fırsatları. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Dergisi, 29(4), 735-743.

- Feng, H., Chen, L., Xie, Z. and Sun, F. (2014). Constructal entransy dissipation rate minimization for variable cross-section insulation layer of the steel rolling reheating furnace wall. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 52: 26-32.
- Halıcı ve Gündüz, (2010). Örneklerle ısı geçişi, ısı transferi. Birsen yayınevi, 0029, 563, İstanbul
- Kılınç, E. (2012). Endüstriyel fırınlarda enerji analizi ve verim artırıcı yöntemler. Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina mühendisliği anabilimdalı, Yüksek lisans tezi.
- Kotas, (1995). Kotas, T.J., *The Exergy Method of Thermal Plant Analysis*, Krieger Publishing Company, Malabar, Florida, USA, 1995, 328 pages.
- Manatura K. and Tangtrakul M. (2010). A study of specific energy consumption in reheating furnace using regenerative burners combined with recuperator. *Silpakorn U Science & Tech J.*, 4 (2): 7-13.
- M. Hasanuzzaman, R. Saidur and N. A. Rahim, (2011). Energy, exergy and economic analysis of an annealing furnace. *International Journal of the Physical Sciences* Vol. 6(6), pp. 1257-1266, 18 March, 2011
- Misra, R., Sahoo, P., Gupta, A. (2006). Thermoeconomic evaluation and optimization of an aqua-ammonia vapor-absorption refrigeration system. *International Journal of Refrigeration* , 47-59, 47-59.
- Si, M., Thompson, S. and Calder, K. (2011). Energy efficiency assessment by process heating assessment and survey tool (PHAST) and feasibility analysis of waste heat recovery in the reheat furnace at a steel company. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1): 2904-2908
- TCUD, (2019). Türkiye Çelik Üreticileri Derneği <http://celik.org.tr/harita/#!>
- TDDMM, (2016). Türkiye Demir Ve Demirdışı Metaller Meclisi Raporu 2016
- Tontu, M. (2013). Energy and exergy analysis of a steam power plant Buharlı güç santralinin enerji ve ekserji analizi
- Turan, M. (2009). Bir endüstriyel kurutucunun performansının enerji ve ekserji yöntemi kullanarak belirlenmesi / Determination of an industrial dryer's performance with using energy and exergy method
- Turgutlu, Yurddaş, (2015). Bir Isıl İşlem Fırınının Termodinamik Analizi, CBÜ Fen Bil. Dergi, Cilt 12, Sayı 1, 75-92 s
- Türközü, (2008). Çumra Şeker Fabrikası Ekserji Analizi

Tütünoğlu, Y., Güven, A., Öztürk, İ. T. (2012). “Cam Temperleme Fırınında Enerji Analizi,” TMMOB MMO Mühendis ve Makina Dergisi, cilt 53, sayı 629, s.55-62

Vatandaş, S. (2016). Sanayi fırınlarında enerji ve ekserji verimliliği; örnek çalışma emaye pişirme fırını verimlilik projesi enerji ve ekserji analizlerinin gerçekleştirilmesi. Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina mühendisliği anabilimdalı, Yüksek lisans tezi.

Yüncü, Hafit., (2010). Ekserji Analizi “İkinci Kanun Verimi & Termoekonomi”. OTDÜ Basımevi, Ankara.



ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Doğan ÇELİK
Doğum Yeri ve Yılı : Manisa, 1982
Medeni Hali : Evli
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : eposta@sdu.edu.tr



Eğitim Durumu

Lise : Manisa Teknik Lisesi, 1999
Lisans : SDÜ, Teknik Eğitim Fakültesi, Tesisat Öğretmenliği / 2006
Lisans : Dokuz Eylül Üniversitesi, Makina Mühendisliği / 2017

Mesleki Deneyim

HABAŞ Demir-Çelik Fabrikası	2006-2014
Mayr-Melnhof Graphia	2014-2017
BMC Otomotiv A.Ş.	2017-..... (halen)